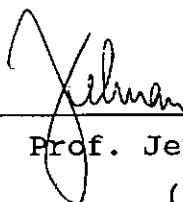


INFLUÊNCIA DO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO CÁLCULO DA
ENERGIA FIRME DE UM SISTEMA HIDRELÉTRICO INTERLIGADO

JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL.

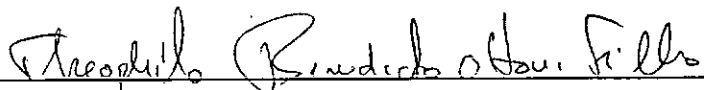
Aprovada por:



Prof. Jerson Kelman, Ph.D.
(Presidente)



Prof. Paulo Canedo de Magalhães, Ph.D.



Prof. Theóphilo B. Ottoni Filho, Ph.D.

AZEVEDO, JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE

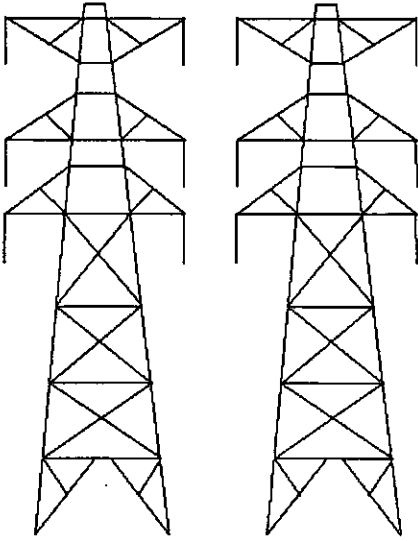
Influência do Uso da Água para Irrigação no Cálculo da Energia Firme de um Sistema Hidrelétrico Interligado [Rio de Janeiro] 1992, VIII, 112 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1992)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Geração de Séries Sintéticas de Vazões Derivadas para Irrigação

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

USOS MÚLTIPLOS



ENERGIA



IRRIGAÇÃO

COMO ADMINISTRAR OS POSSÍVEIS CONFLITOS?

Este trabalho
é dedicado
à minha esposa,
meus filhos
e meus pais.

AGRADECIMENTOS

A DEUS por me dar saúde, força e paz espiritual.

Ao Prof. Jerson Kelman, pela orientação e apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Sylvio Campello, pela revisão do texto, incentivo e apoio na coleta de dados junto à SUDENE.

À CHESF, através dos funcionários Eliane, Flávia, Frederico, Geraldo, Miranda, Pedro, Renata, Ronaldo e Ximenes pelo suporte e apoio na elaboração deste trabalho. Especial agradecimento aos engenheiros Chico, Denys e Mêuser pela valiosa ajuda.

Aos colegas do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE: Almir, Suzana e Abelardo pela apoio e incentivo, e a Rolim pela ajuda na elaboração das figuras. Aos Professores Vicente e Mafra da UFRPE pelo apoio bibliográfico e técnico na área de irrigação. Especial agradecimento ao Prof. Abelardo Cardoso Montenegro pela grande ajuda no início de minha carreira.

Aos funcionários do Núcleo de Processamento de Dados da UFPE, especialmente a Almir, Clarisse e Lula pelo suporte, paciência e ajuda na utilização dos computadores.

Aos meus parentes Cícero Antônio, Délio, João Carlos e José Solon, e ao amigo Sérgio Pinto pelo apoio e ajuda no Rio de Janeiro. Ao meu irmão Paulo e aos cunhados Jorge e Deângela pelo apoio e valiosa ajuda.

Aos meus companheiros de apartamento no Rio de Janeiro Alexandre, Joaquim e Paulo pela saudável e feliz convivência. Aos meus companheiros de curso de mestrado especialmente a Samuel e Simone pelo apoio e amizade.

À Universidade Federal de Pernambuco, que nos proporcionou as condições necessárias à realização do curso e elaboração da tese.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

INFLUÊNCIA DO USO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO CÁLCULO DA ENERGIA FIRME DE UM SISTEMA HIDRELÉTRICO INTERLIGADO

JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO

MAIO, 1992

Orientador: Prof. Jerson Kelman

Programa: Engenharia Civil

Apresenta-se uma metodologia para o cálculo da demanda de água para uso em irrigação e sua influência na produção de energia de um sistema hidrelétrico interligado.

A aplicação do cálculo da demanda de água para irrigação foi feita para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, e a verificação da influência dessa vazão derivada na produção de energia elétrica no sistema hidrelétrico do Nordeste (sistema CHESF).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

IRRIGATION WATER INFLUENCE IN THE FIRM ENERGY EVALUATION OF AN
INTER-CONNECTED HYDROPOWER SYSTEM

JOSÉ ROBERTO GONÇALVES DE AZEVEDO

MAY, 1992

Thesis Supervisor: Jerson Kelman

Department: Civil Engineering

Presents a methodology to evaluation of water demand for irrigation use and its influence in an inter-connected hydropower system energy production.

An application of the irrigation water evaluation using the São Francisco river-basin is presented verifying its influence over the electrical energy production in Northeast hydropower system (CHESF system).

ÍNDICE

I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Conflitos de Uso da Água.....	1
1.2 - Objetivos e Metodologias.....	2
1.3 - Conteúdo do Trabalho.....	2
II - REVISÃO DA LITERATURA.....	4
III - FATORES INTERVENIENTES NO CÁLCULO DA VAZÃO DERIVADA PARA IRRIGAÇÃO.....	14
3.1 - Fatores Climatológicos.....	14
3.1.1 - Evapotranspiração Potencial.....	14
3.1.2 - Evapotranspiração Real.....	20
3.1.3 - Precipitação Provável.....	21
3.1.4 - Precipitação efetiva.....	23
3.2 - Fatores Agrícolas.....	29
3.2.1 - Plano Cultural.....	29
3.2.2 - Coeficiente de Cultura Médio.....	29
3.2.3 - Área Efetivamente Irrigada.....	31
3.2.4 - Eficiências e Coeficiente de Retorno.....	31
IV- METODOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS DOS FATORES INTERVENIENTES NO CÁLCULO DA VAZÃO DERIVADA PARA IRRIGAÇÃO.....	35
4.1 - Demandas de Água para Irrigação.....	35
4.1.1 - Evapotranspiração Potencial (ETP).....	35
4.1.2.- Precipitação	39
4.1.3 - Plano Cultural e Coeficiente de Cultura Médio.....	45
4.1.4 - Vazão Unitária.....	49
4.2 - Demandas de Água por Usina Hidrelétrica.....	54
4.2.1 - Área Irrigável Disponível.....	54
4.2.2 - Área Efetivamente Ocupada	59
4.2.3 - Eficiências e Coeficientes de Retorno e de Uso da Água.....	61
4.2.4 - Vazão Derivada a Montante de cada Usina.....	62
V - METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA ENERGIA FIRME.....	65

VI - APLICAÇÃO DO ESTUDO AO SISTEMA HIDRELÉTRICO INTERLIGADO DO NORTE/NORDESTE.....	68
6.1 - Descrição das Características do Sistema Norte/Nordeste...	68
6.2 - Cálculo da Energia Firme.....	71
6.3 - Análise dos Resultados.....	80
VII - ESTUDO DE SENSIBILIDADE.....	81
7.1 - Geração das Séries Sintéticas.....	81
7.2 - Cálculo da Energia Firme.....	81
7.3 - Análise dos Resultados.....	89
VIII- CONCLUSÕES FINAIS.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
APÊNDICE A.....	96
A.1 - Descrição do Modelo SIMULADIN.....	97
A.2 - Modificações Introduzidas no Modelo SIMULADIN.....	99
APÊNDICE B.....	102
B.1 - Configuração do Sistema Interligado Norte/Nordeste.....	103

I - INTRODUÇÃO

1.1 - CONFLITOS DE USO DA ÁGUA

O desenvolvimento social e econômico de uma região acarreta a elevação do uso de água, implicando, às vezes, na deterioração de sua qualidade. O uso racional dos recursos hídricos, significa repartir esse bem natural judiciosamente entre várias finalidades. Assim, os aproveitamentos hidrelétricos, especialmente os de grandes dimensões, devem ter múltiplos fins, a partir da análise das repercussões para montante e jusante.

A preocupação na avaliação dos impactos causados na produção de energia da cascata de usinas hidrelétricas de uma bacia hidrográfica pelos múltiplos usos da água, como irrigação, abastecimentos doméstico e industrial, navegação e prevenção de enchentes, entre outros, têm levado vários órgãos a elaborar estudos e avaliações técnico-econômicos com essas considerações.

Particularmente, para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) tem desenvolvido alguns trabalhos com objetivos de avaliar o impacto na produção de energia elétrica provocado pela retirada, para irrigação, de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas instaladas no trecho compreendido entre a divisa dos estados de Minas Gerais com a Bahia e a foz. De acordo com as conclusões desses trabalhos e outros similares, o único uso alternativo capaz de influenciar, de forma significativa, a produção de energia elétrica é a irrigação.

A utilização de métodos estocásticos permite gerar um grande número de séries sintéticas de vazões derivadas para irrigação, facilitando, conseqüentemente, a análise do impacto causado na produção de energia elétrica atual e futura.

As metodologias desenvolvidas neste trabalho, aplicadas à bacia do rio São Francisco, poderão ser generalizadas a outra bacia.

1.2 - OBJETIVOS E METODOLOGIAS

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia capaz de gerar séries sintéticas de vazões derivadas para irrigação, verificar a influência deste uso alternativo no cálculo da energia firme de um sistema hidrelétrico interligado, e estudar a sensibilidade dos fatores intervenientes no cálculo dessas vazões. Para tanto, foram utilizados modelos tradicionais na geração das séries sintéticas de vazões. O modelo SIMULADIN, descrito no apêndice (A), foi utilizado no cálculo da energia firme do sistema hidrelétrico interligado.

A aplicação do trabalho foi realizada na bacia hidrográfica do rio São Francisco, e no sistema hidrelétrico interligado Norte/Nordeste. As informações técnicas básicas foram extraídas de publicações da CHESF, do Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco (PLANVASF), de relatórios da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco (CODEVASF) e de outras fontes de consulta relacionadas na bibliografia.

1.3 - CONTEÚDO DO TRABALHO

O capítulo (II) apresenta a revisão da literatura.

O capítulo (III) descreve as características principais dos fatores intervenientes no cálculo das vazões a serem derivadas para projetos de irrigação.

O capítulo (IV) contém uma descrição dos dados necessários dos modelos de geração, e do método de estimação dos parâmetros dos modelos utilizados para geração de séries sintéticas de vazões derivadas para irrigação. Apresenta-se também nesse capítulo uma aplicação da metodologia desenvolvida para a bacia hidrográfica do rio São

Francisco.

No capítulo (V) conceitua-se e apresenta-se o método iterativo para cálculo da energia firme.

A seguir, no capítulo (VI), é descrito o sistema hidrelétrico interligado do Norte/Nordeste; procede-se o cálculo da energia firme, admitindo-se o emprego alternativo de retirada d'água para irrigação; e analisa-se finalmente a influência dessa retirada na produção de energia do sistema hidrelétrico da CHESF.

O capítulo (VII) apresenta a sensibilidade dos fatores intervenientes no cálculo da vazão retirada para irrigação.

O capítulo (VIII) contém a discussão dos resultados obtidos e as conclusões finais.

Em anexo apresenta-se o modelo SIMULADIN e descrevem-se as modificações realizadas no mesmo para possibilitar a leitura do arquivo de vazões derivadas para irrigação, e a impressão dos déficits mensais de energia, necessários ao cálculo da energia firme do sistema hidrelétrico interligado; também aí são apresentados tabelas, figuras, e dados complementares, necessários à compreensão e aplicação das metodologias ora desenvolvidas.

II - REVISÃO DA LITERATURA

A possibilidade de conflito devido ao múltiplo uso das águas do rio São Francisco tem levado ao desenvolvimento de diversos trabalhos sobre o assunto, principalmente a partir do fim da década dos anos 70.

Dos vários trabalhos pesquisados por este autor apenas dois, CODEVASF (1977) e PLANVASF (1988), serão aqui apresentados. Isto deveu-se ao fato de serem os únicos trabalhos que utilizaram, no nosso entendimento, metodologias compatíveis com o do presente trabalho no cálculo da vazão derivada para irrigação e, conseqüentemente, possibilidade de comparação de resultados quando da avaliação de sua influência na produção de energia elétrica.

A quase totalidade dos demais trabalhos, tais como PEREIRA (1977), CHESF/DSG (1982, 1983a, 1983b e 1983c), ANDRADE FILHO (1984), CHESF/DSG (1984, 1985a e 1985b) e FROITZHEIN et alii (1987), estima a vazão derivada para irrigação pelo produto de uma vazão unitária média mensal, e algumas vezes até anual, pela área irrigável disponível. Essa vazão unitária média é extraída, na maioria das vezes, de documentação internacional sobre irrigação. Não são admitidos, portanto, os efeitos espaciais e sazonais dessa variável. A adoção dessa metodologia acarreta conseqüências graves quando aplicada à bacia hidrográfica do rio São Francisco, devido a sua vasta superfície, cerca de 640 mil Km², sendo por conseguinte, constituída por áreas não homogêneas, com contrastes na geologia, relevo, clima, vegetação e tantos outros fatores.

O trabalho da CODEVASF (1977) foi elaborado com a finalidade de contribuir ao esforço conjunto desenvolvido por diversos órgãos da administração federal, através de um Grupo de Trabalho criado pela ELETROBRÁS, com o objetivo de encontrar soluções adequadas para o uso múltiplo das águas do rio São Francisco.

A estimativa das área irrigáveis disponíveis na época foi feita baseada em levantamentos realizados pela própria CODEVASF, chegando-se a uma área irrigável máxima na bacia, através de informações

complementares introduzidas em estudo desenvolvido anteriormente pelo U.S. BUREAU OF RECLAMATION. A CODEVASF previu um cronograma de implantação dessas áreas até o ano 2000, segundo os seguintes critérios:

- 1 - possibilidade de irrigação de expressivas áreas com o aproveitamento de barragens de múltiplos usos;
- 2 - a localização mais próxima de centros de consumo;
- 3 - as facilidades de infra-estrutura econômica e social.

O cronograma elaborado apresenta uma área irrigável de aproximadamente 1,5 milhões de hectares no ano 2000. Não se encontram disponíveis, no referido trabalho, mapas com a localização dos perímetros levantados.

O trabalho prevê a construção de diversas barragens de múltiplo uso para o atendimento à demanda de água para irrigação, à produção de energia elétrica e à navegação, essa última com a finalidade de proporcionar o escoamento da produção agrícola através do rio. O cronograma de implantação e as características desses aproveitamentos estão mencionados no referido trabalho.

A influência do sistema proposto sobre a produção de energia elétrica da CHESF foi feito através da estimativa da vazão derivada para irrigação da totalidade da área inventariada e a simulação do fluxo d'água do rio São Francisco para o ano 2000. Para tanto, foram calculados, por unidade de área, a vazão média mensal derivada para uso na irrigação e o retorno médio mensal da água derivada.

O cálculo dos desvios médios unitários mensais foi determinado com base na evapotranspiração das culturas recomendadas, nas chuvas confiáveis (precipitação dependente), nas perdas por condução, infiltração e escoamento superficial, e nas perdas por evaporação da superfície do solo quando saturado pela irrigação. Nesses cálculos foram considerados valores fixos correspondentes a 34% para a eficiência total do sistema de irrigação, 61% para o retorno e 5% para

as perdas por evaporação.

Quanto aos retornos médios unitários mensais, o cálculo foi realizado por duas alternativas:

1 - através do balanço hídrico entre a evapotranspiração da vegetação natural e a da cultura recomendada, quando ocorriam no perímetro chuvas confiáveis de valor superior à necessidade das culturas (não havendo, portanto, necessidade de desvio);

2 - através do total das perdas retornáveis somadas à diferença entre a evapotranspiração da vegetação natural e as chuvas confiáveis, quando havia necessidade de desvio.

Foi estimada para a área máxima irrigável (2,3 milhões de hectares) os valores dos desvios e retornos mensais através do produto das áreas dos perímetros irrigados pelos desvios e retornos médios unitários, respectivamente, determinando-se a seguir, por simples balanço hídrico, a derivação média para uso em irrigação com valor de $297,70 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para efeito de simulação mensal do fluxo d'água do rio São Francisco os desvios e retornos foram admitidos ocorrendo simultaneamente. Considerou-se na simulação os valores médios mensais afluentes à bacia, referidos ao período seco crítico (1952/1956). Outras hipóteses de cálculo e as tabelas com os resultados das simulações do fluxo no rio São Francisco e principais afluentes encontram-se disponíveis no referido trabalho.

As conclusões do trabalho da CODEVASF (1977) mais significativas para os objetivos do presente trabalho são as seguintes:

- A implantação de programas de irrigação no vale do São Francisco poderá atingir a totalidade da área atualmente cadastrada como irrigável (cerca de 2,3 milhões de hectares) sem que o desfalque médio de aproximadamente $300 \text{ m}^3/\text{s}$ cause perda sensível da geração abaixo da barragem de Sobradinho.

- Considerando-se, porém, que os picos de desfalques dos sistemas de irrigação são coincidentes com as vazões mínimas do São Francisco, acorda-se em que toda a programação para o vale deverá ser feita de maneira a integrar os sistemas de irrigação com os de armazenamento para regularização do caudal.

- através da análise dos resultados da simulação da programação integrada para o ano 2000, conclui-se sobre o benefício para todos os setores pois, além de permitir a irrigação de 1.500.000 hectares, melhora sensivelmente as condições de navegabilidade comercial do rio e agrega cerca de 600 MW a mais de energia firme ao sistema CHESF, com o sistema de barragens proposto, quando totalmente motorizadas.

O trabalho do PLANVASF (1988), foi elaborado com a colaboração de técnicos da CHESF, com o objetivo principal de analisar os limites aceitáveis de interferência no regime hídrico da bacia do rio São Francisco, entre os seus usuários, quando manejado segundo regras ou condições pré-estabelecidas.

Para esse estudo o PLANVASF desenvolveu um modelo matemático de simulação hidrológica que permitiu, preliminarmente avaliar a disponibilidade dos recursos hídricos superficiais da bacia do rio São Francisco frente aos principais usos como irrigação, abastecimento doméstico e industrial, navegação, diluição de poluentes orgânicos (incluindo nessa restrição a vazão ecológica), geração de energia elétrica, bem como ao controle de enchentes e à perda de água por evaporação nos reservatórios implantados na calha principal.

Essa avaliação preliminar levou a conclusão de que os usos, excetuando a irrigação e a geração de energia, são compatíveis. As restrições de vazão para navegação e para diluição de poluentes são atendidas com as vazões mínimas necessárias para a geração de energia. A ordem de grandeza das vazões desviadas para abastecimento doméstico e industrial (inferior a $15 \text{ m}^3/\text{s}$ no ano 2000), não é significativa quando comparada a vazão firme das usinas da CHESF (aproximadamente $2000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Para as simulações hidrológicas o PLANVASF utilizou o modelo

SIMULADIN, descrito posteriormente no corpo do presente trabalho. As demandas de água para irrigação foram determinadas através do modelo matemático desenvolvido pelo PLANVASF (1987).

A análise da interferência da irrigação sobre a geração de energia elétrica foi feita através de três sistemas de geração: o da CEMIG (Concessionária Estadual de Minas Gerais), o da CHESF e o da ELETRONORTE, sendo esses dois últimos interligados.

O rio São Francisco foi dividido em dois trechos para fins de análise da interferência das vazões derivadas para irrigação na geração de energia elétrica: o trecho mineiro (CEMIG) e o trecho nordestino (CHESF interligado com a ELETRONORTE).

Para o trecho mineiro a análise foi baseada na comparação das vazões firmes das usinas hidrelétricas com as vazões derivadas para irrigação. Para o nordestino foram utilizados os resultados do modelo de simulação SIMULADIN, sendo a energia firme do sistema o parâmetro adotado para análise.

A metodologia adotada pelo PLANVASF (1988) consiste em comparar as capacidades de geração de energia firme das usinas hidrelétricas implantadas, ou a implantar na calha principal da bacia, com e sem o uso da água para outros fins que não a hidroeletricidade.

O PLANVASF optou, por simplicidade, pelo critério determinista para o cálculo da previsão das perdas anuais de geração de energia devido à irrigação. Os cenários foram montados para os anos de 1987 até o ano 2000, tendo como base os principais usos analisados que são irrigação e geração de energia.

Para as áreas irrigáveis os cenários foram determinados para os anos 1987, 1991, 1995 e 2000, utilizando-se informações disponíveis para quantificar as áreas irrigáveis implantadas em 1987 e as metas preconizadas pelo Ministério da Irrigação para os demais anos. Para os anos intermediários a estimativa das áreas irrigáveis foi feita por simples interpolação geométrica.

As configurações adotadas para as usinas hidrelétricas foram baseadas no programa de obras de geração da CHESF, durante o ciclo de trabalho de 1987, porém não encontram-se disponíveis no trabalho do PLANVASF (1988).

Além da geração de energia e a irrigação, o PLANVASF considerou nas simulações do rio São Francisco outros usos e restrições de vazões como o controle de cheias, as perdas por evaporação nos reservatórios e as restrições para navegação e diluição de poluentes, bem como os desvios para usos domésticos e industriais.

Para o cálculo das perdas de energia no sistema CHESF, foram realizadas duas simulações para cada cenário. Uma que não considerava retiradas d'água para irrigação e outra que as considerava. A diferença entre essas duas simulações é a perda de energia firme do sistema.

A seguir serão descritos os elementos adotados no cálculo das vazões derivadas para irrigação, utilizando-se o modelo desenvolvido pelo PLANVASF (1987).

O modelo calcula a vazão mensal derivada para irrigação de cada perímetro, em cada cenário, através da seguinte expressão:

$$QTOTAL_{i,\tau} = \frac{(ETP_{i,\tau} \cdot CUCM_{i,\tau} - PRE_{i,\tau}) \cdot 10 \cdot ARE_i \cdot COAC \cdot CUA}{24 \cdot DM_{\tau} \cdot 3600 \cdot Et} \quad (II.1)$$

onde para o mês τ e o perímetro i :

- $QTOTAL_{i,\tau}$ - vazão total em m^3/s .
- $ETP_{i,\tau}$ - evapotranspiração potencial em milímetros.
- $CUCM_{i,\tau}$ - coeficiente de uso consuntivo médio.
- $PRE_{i,\tau}$ - precipitação efetiva média em milímetros.
- ARE_i - área irrigável implantada em hectares.
- $COAC$ - coeficiente de ocupação da área cultivada.
- CUA - coeficiente de uso da água.
- DM_{τ} - número de dias do mês τ .
- Et - eficiência total do sistema de irrigação.

O coeficiente de uso da água foi determinado pelo modelo PLANVASF (1987) através da seguinte expressão:

$$CUA = 1 - C_r \quad (II.2)$$

onde C_r representa o coeficiente de retorno da água ao rio.

A vazão média mensal derivada para uso em irrigação a montante de cada usina foi estimada pela equação:

$$QUSINA_{j,\tau} = \sum_{i=1}^{NP} QTOTAL_{i,\tau} \quad (II.3)$$

onde:

$QUSINA_{j,\tau}$ - vazão média mensal da usina j no mês τ em m^3/s .

NP - número de perímetros de irrigação existentes entre a usina j e aquela imediatamente a montante na cascata.

A evapotranspiração potencial média (ETP) foi determinada através do estudo de regionalização, elaborado pelo PLANVASF (1986a), para a bacia do rio São Francisco.

Para o coeficiente de uso consuntivo médio (CUCM), também chamado de coeficiente de cultura médio (K_c), o PLANVASF (1988) admitiu 1,05 para o cultivo de arroz e 0,80 para um cultivo genérico, representando os demais cultivos. Foi admitido para cada perímetro o cultivo do arroz ou do genérico, em duas safras de quatro meses cada, resultando, portanto, em um consumo d'água para irrigação em apenas oito meses do ano.

Para a precipitação efetiva (PRE) foram adotados os valores médios mensais determinados pelo PLANVASF (1986), quando da regionalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco.

A área de cada perímetro (ARE) foi determinada, conforme a

metodologia anteriormente mencionada.

Para o coeficiente de ocupação da área cultivada (COAC) foi utilizado o valor teórico de 0,75, recomendado pelo Setor Agropecuário da própria PLANVASF.

Para o coeficiente de uso da água (CUA), o PLANVASF admitiu um valor constante e igual a 0,65, determinado em função de um coeficiente de retorno igual a 0,35. O PLANVASF cita que esse índice foi obtido de levantamentos realizados nos perímetros implantados da CODEVASF, porém não apresenta os dados e nem indica nenhuma referência bibliográfica.

O valor adotado para a eficiência do sistema de irrigação foi de 0,40. Novamente aqui, o PLANVASF cita, sem contudo apresentar os dados e nem indicar referência bibliográfica, que esse índice é resultado da média das eficiências totais levantadas dos perímetros implantados pela CODEVASF no ano de 1986.

Uma descrição detalhada sobre o modelo matemático encontra-se disponível em PLANVASF (1987). As tabelas com os resultados obtidos desse modelo para o cálculo das vazões média mensais derivadas para irrigação encontram-se disponíveis no trabalho do PLANVASF (1988).

Adotando estas vazões derivadas para irrigação e as vazões históricas do período seco mais crítico para a região (1952/1955), o PLANVASF (1988) utilizou simulações, através do modelo SIMULADIN e de um processo heurístico de convergência, para estimar as perdas médias de energia firme do sistema CHESF. A tabela (II.1) apresenta os resultados obtidos dessas simulações.

ANO	RESULTADOS DO PLANVASF			
	ÁREA IRRIGÁVEL (ha)	ENERGIA FIRME SEM IRRIGAÇÃO (MW)	PERDA DE ENERGIA FIRME (MW)	PERCENTAGEM PERDA/ENERGIA FIRME
1987	90.809	2577	32	1,2
1988	134.246	3427	29	0,8
1989	198.459	3427	83	2,4
1990	293.388	3427	137	4,0
1991	433.725	3494	192	5,5
1992	471.268	3494	248	7,1
1993	512.061	5721	304	5,3
1994	556.385	5721	360	6,3
1995	604.544	5721	416	7,3
1996	646.391	5721	444	7,8
1997	691.134	5721	472	8,3
1998	738.974	6959	499	7,2
1999	790.126	6959	604	8,7
2000	844.800	6959	713	10,2

TABELA (II.1) - PERDAS DE ENERGIA FIRME DO SISTEMA CHESF ESTIMADAS POR PLANVASF (1988).

Em função dos resultados obtidos o PLANVASF (1988) apresentou as seguintes conclusões mais significativas para o objetivo do presente trabalho:

- As derivações de águas para uso em projetos de irrigação , na bacia do rio São Francisco, já estão (1987) afetando a capacidade de geração das usinas da CHESF na calha principal.

- Todas as indicações são no sentido de que as interferências irão aumentar, em função da expansão da área irrigada e da instalação de potência nos rios da bacia, notadamente na calha principal.

- No trecho nordestino a perda de energia firme foi de 32 $\overline{\text{MW}}$ em 1987, representando 1,24 % da capacidade do sistema de produção da CHESF, e a previsão é de que alcance 713 $\overline{\text{MW}}$ no ano 2000, equivalentes a 10,24 % da capacidade de produção da Empresa.
- A conclusão técnica geral sobre a concorrência das atividades de produção de energia hidrelétrica e irrigação, é que os recursos hídricos da bacia do rio São Francisco estão se tornando escassos e já não podem ser considerados de modo individualizado, por qualquer das atividades consumidoras.
- A análise custo/benefício realizada mostrou que a atividade de irrigação, como garantia da colheita, constitui a melhor opção de investimento, quando comparada com outras alternativas regionais para a criação de empregos.
- A nível intersetorial a mesma análise mostrou que, no período 1988-2000, o valor das colheitas garantidas supera o valor econômico do déficit energético global, em 60,8 %. Contudo, a instalação de potência na bacia aumenta o valor unitário do déficit energético em relação à área irrigada de modo que, no ano 2000, o valor unitário do déficit já será praticamente igual ao valor da colheita garantida por hectare, tendendo a situação relativa de ganhos e perdas entre os setores a se inverter. Confirma-se, através dessa conclusão, a necessidade de se estabelecer critérios para a repartição do uso das águas da bacia do rio São Francisco entre as atividades consumidoras.

III- FATORES INTERVENIENTES NO CÁLCULO DA VAZÃO DERIVADA PARA IRRIGAÇÃO

3.1- FATORES CLIMATOLÓGICOS

3.1.1- Evapotranspiração Potencial

Com o objetivo de manter as mesmas terminologias e definições utilizadas pela CODEVASF, a evapotranspiração potencial de referência será tratada neste trabalho como simplesmente evapotranspiração potencial (ETP), e a evapotranspiração potencial de um cultivo como evapotranspiração real do cultivo (ETR).

A evapotranspiração é a quantidade de água perdida pela evaporação do solo e pela transpiração das plantas. Segundo SILVA e SILVA (1983) a evapotranspiração potencial (ETP) é aquela verificada em uma superfície vegetada com grama batatais (*Paspalum Notatum* L.), sem restrição de água, em fase de desenvolvimento ativo e com bordadura adequada; sendo assim, ETP é função exclusivamente das variações climáticas, especialmente a radiação solar. HARGREAVES (1975) define a ETP como sendo a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, densa, rasteira, com ativo crescimento (geralmente se usa grama) e com fornecimento contínuo e adequado de água.

Existem vários métodos empíricos para o cálculo da ETP, entre os quais destacam-se, segundo FAO(1977), MINTER(1984) e ITURRI(1983), os métodos de Hargreaves, o de Penman, o do tanque classe A, o da Radiação e o de Blaney-Criddle.

A escolha do método deve ser baseada no tipo de dado climático disponível e na precisão requerida no cálculo da necessidade de água pela cultura. Isso implica em adotar uma equação cujas variáveis climáticas sejam bastantes sensíveis às mudanças de estações do ano. Assim, na região equatorial, onde a temperatura varia pouco, não se deveria tomar uma equação para a qual a temperatura fosse a única variável. Na tabela abaixo são mostrados os dados necessários para cada

um dos métodos acima citados.

MÉTODO	TEMPE- RATURA	UMI- DADE	VENTO	INSO- LAÇÃO	RA- DIAÇÃO	EVAPO- RAÇÃO	CONDIÇÕES LOCAIS
HARGREAVES	*	[*]	0	[*]	[*]		0
PENMAN	*	*	*	*	(*)		0
RADIAÇÃO	*	0	0	*	(*)		0
TANQUE CLASSE A		0	0			*	*
BLANEY-CRIDDLE	*	0	0	0			0

0 Dados estimados (*) Se disponíveis, mas não essenciais

* Dados medidos [*] Pelo menos um dos dados deve ser medido

TABELA (III.1) - DADOS NECESSÁRIOS PARA OS MÉTODOS DE CÁLCULO DA ETP.

O método de Penman é possivelmente o mais preciso de todos aqui apresentados; baseia-se na interpretação do fenômeno de intercâmbio de energia e das condições aerodinâmicas que cercam a superfície, sendo os parâmetros da equação ajustados com medições diretas em lisímetros. Este método normalmente não é utilizado por requerer observações meteorológicas que quase sempre não se encontram disponíveis nas estações meteorológicas.

O método da Radiação necessita também de dados de insolação, nebulosidade ou radiação que, como mencionado para o método de Penman, são dados normalmente não disponíveis. Este método apresenta resultados, segundo a FAO(1977), menos precisos que o de Penman, sendo somente utilizados em lugar do anterior, quando dados de vento e/ou umidade não estiverem disponíveis.

Os métodos de Blaney-Criddle e o do tanque classe A também precisam ser calibrados em lisímetros. São métodos simples e os dados requeridos são facilmente encontrados em todas as estações meteorológicas. A desvantagem está no uso adequado de seus coeficientes que podem dar resultados com erros numa magnitude muito elevada, por exemplo acima de 20%, valor não aceitável na maioria dos projetos de irrigação.

O método de Hargreaves baseou-se na interpretação das observações de ETP feitas em lisímetros instalados na Universidade de Davis na Califórnia. Mediante análise de regressão, Hargreaves conseguiu uma relação entre as observações de ETP e a temperatura e a radiação solar incidentes conjuntamente, com coeficiente de correlação variando entre 94% e 98%, segundo HARGREAVES (1975). Em presença das variáveis mencionadas, Hargreaves encontrou que outras variáveis do clima, como umidade relativa e a velocidade do vento não contribuíam significativamente para a variação da ETP, porém encontrou uma associação importante entre a umidade relativa e a percentagem de horas de insolação. O método foi ainda aplicado, utilizando-se medições feitas em outros lisímetros implantados em diversas partes do mundo, sem contudo haver melhorado de forma sensível a análise inicial feita na Califórnia.

A fórmula que calcula a evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves, depende dos dados disponíveis. O método tem a vantagem de permitir o cálculo por três alternativas:

- em função da radiação solar incidente e da temperatura;
- em função da insolação, da radiação extra-atmosférica e da temperatura;
- em função da umidade relativa, da radiação extra-atmosférica e da temperatura.

Na segunda e terceira alternativas, a radiação solar incidente é estimada em função da radiação solar extra-atmosférica (constante segundo a hora, a posição da terra em relação ao sol, e para uma dada latitude) e das horas de insolação registradas (alternativa 2) ou da umidade relativa (caso 3).

Neste trabalho, empregamos o método de Hargreaves, por ser um dos métodos mais indicados para a região Nordeste do Brasil, tendo sido aplicado em diversos postos meteorológicos do Nordeste pelo seu autor. A ETP foi calculada pela 3ª alternativa, pois dispusemos apenas de dados de temperatura e umidade relativa no posto de Cabrobó - PE,

tomado como referência para a geração de séries sintéticas, assunto tratado no próximo capítulo. A seguir, é apresentada a metodologia para cálculo de ETP por essa 3ª alternativa; as outras podem ser encontradas em ITURRI (1983).

Os dados necessários à estimativa da ETP pela equação (III.1) são a temperatura média mensal em °C (TMC), a umidade relativa média mensal (HM) e a latitude local em graus e décimos de graus (LAT).

$$ETP = 4,0132 \cdot 10^{-4} \cdot (RMM \cdot DL \cdot CLA \cdot CH \cdot TMF) \quad (III.1)$$

onde:

ETP - evapotranspiração potencial em mm/mês.

RMM - radiação extra-atmosférica convertida em mm/mês de evaporação equivalente.

DL - média mensal da duração do dia entre o amanhecer e o pôr-do-sol em horas por dia.

CLA - coeficiente relativo à latitude local.

CH - coeficiente de correção da umidade relativa média mensal.

TMF - temperatura média mensal em °F.

A radiação extra-atmosférica RMM convertida em mm/mês de evaporação equivalente é calculada pela equação (III.2) em função do número de dias do mês (DM), da média mensal da radiação extra-atmosférica (RLD) em cal/cm²/dia e do calor latente de vaporização da água (L) em cal/cm³.

$$RMM = \frac{10 \cdot (DM \cdot RLD)}{L} \quad (III.2)$$

A radiação extra-atmosférica RLD é calculada pela seguinte expressão:

$$RLD = \frac{916,732 \cdot [OM \cdot \text{SEN}(XLA) \cdot \text{SEN}(DEC) + \text{COS}(XLA) \cdot \text{COS}(DEC) \cdot \text{SEN}(OM)]}{ES} \quad (III.3)$$

onde:

OM - ângulo horário calculado pela equação (III.4) em radianos.

XLA - latitude em radianos calculado pela equação (III.5).

DEC - declinação média mensal da terra em radianos, ver tabela (III.2).

ES - relação entre a distância média mensal do sol a terra e a distância média anual, ver tabela (III.2).

Essa declinação média mensal é considerada, tendo em vista que o plano do equador forma com o plano da elíptica (órbita da terra em torno do sol) um ângulo de $23^{\circ}27'$. Assim, a quantidade de calor absorvida pela superfície da terra depende do ângulo que ela forma com a direção de propagação dos raios solares, pois uma unidade de área receberá maior radiação, na medida que seja perpendicular aos raios incidentes. O ângulo de incidência (declinação) dos raios solares sobre a superfície da terra é função, portanto, da estação do ano, da latitude e, certamente, da hora.

$$OM = \cos^{-1}(-\tan(XLA) \cdot \tan(DEC)) \quad (III.4)$$

$$XLA = \frac{LAT}{57,2958} \quad (III.5)$$

onde LAT representa a latitude em graus e décimos de graus.

MÊS	DM	DEC (radianos)	ES
JANEIRO	31	-0,3656	0,97104
FEVEREIRO	28	-0,2365	0,98136
MARÇO	31	-0,04682	0,99653
ABRIL	30	0,1607	1,01313
MAIO	31	0,3247	1,02625
JUNHO	30	0,4017	1,03241
JULHO	31	0,3699	1,02987
AGOSTO	31	0,2360	1,01916
SETEMBRO	30	0,03995	1,00347
OUTUBRO	31	-0,1669	0,98693
NOVEMBRO	30	-0,3291	0,97369
DEZEMBRO	31	-0,4021	0,96812

TABELA (III.2) - DIAS DO MÊS, DECLINAÇÃO MÉDIA MENSAL E RELAÇÃO ENTRE A DISTÂNCIA MÉDIA MENSAL DO SOL A TERRA E A DISTÂNCIA MÉDIA ANUAL.

O calor latente de vaporização da água (L) em cal/cm^3 é calculado pela expressão a seguir:

$$L = 595,9 - 0,55 \cdot \text{TMC} \quad (\text{III.6})$$

onde:

TMC - temperatura média mensal em $^{\circ}\text{C}$.

A média mensal da duração do dia entre o amanhecer e o pôr-do-sol em horas por dia é calculada pela expressão (III.7).

$$\text{DL} = \frac{\text{OM}}{0,1309} \quad (\text{III.7})$$

O coeficiente relativo à latitude (CLA) será a unidade para

latitudes iguais ou inferiores a 64° quando adotada a equação (III.8).

$$CLA = 0,17 \cdot (70 - LAT) \quad (III.8)$$

A umidade relativa média mensal quando calculada pela expressão (III.9) em função de leituras efetuadas às 12:00, às 18:00 e às 24:00 horas de Greenwich (GMT) fica, segundo HARGREAVES (1973), com um valor subestimado em comparação à média de umidade relativa de 24 horas, sendo necessário portanto corrigi-la pela equação (III.10).

$$HM = \frac{HM1200 + HM1800 + 2 \cdot HM2400}{4} \quad (III.9)$$

onde:

HM - umidade relativa média mensal.

HM1200 - umidade medida às 12:00 horas.

HM1800 - umidade medida às 18:00 horas.

HM2400 - umidade medida às 24:00 horas.

$$CH = 0,166 \cdot (100 - HM)^{1/2} \quad (III.10)$$

onde CH será a unidade se $HM \geq 64\%$, quando calculado pela equação anterior.

A temperatura em $^{\circ}F$ (TMF) é calculada a partir da temperatura em $^{\circ}C$ (TMC) pela relação:

$$TMF = \left(\frac{TMC \cdot 9}{5} + 32 \right) \quad (III.11)$$

3.1.2- Evapotranspiração Real

A evapotranspiração real (ETR_i) de um cultivo "i" é o produto da evapotranspiração potencial (ETP) pelo coeficiente de cultura (Kc_i) do cultivo. A rigor, o coeficiente de cultura varia durante o ciclo

vegetativo do cultivo conforme pode ser observado na figura (III.2). Entretanto, adotou-se no presente estudo um valor médio para esse coeficiente, correspondente a cada um dos estágios de crescimento.

$$ETR_1 = ETP \cdot Kc_1 \quad (III.12)$$

A evapotranspiração real mensal média de um perímetro agrícola foi calculada para a evapotranspiração potencial mensal média, e um coeficiente de cultivo mensal Kc , considerado como a média ponderada dos coeficientes de cultivo Kc_1 pela área ocupada por cada cultivo, conforme a equação (III.13).

$$Kc = \frac{\sum_{i=1}^{NC} (Kc_i \cdot A_i)}{\sum_{i=1}^{NC} A_i} \quad (III.13)$$

daí tem-se:

$$ETR = ETP \cdot Kc \quad (III.14)$$

onde:

ETR - evapotranspiração real mensal média em mm/mês.

A_1 - área ocupada pelo cultivo "i" no perímetro agrícola em hectares no mês em questão.

NC - número de cultivos existentes no perímetro agrícola no mês em questão.

Kc - coeficiente de cultura médio mensal do perímetro, descrito em (3.2.2).

3.1.3- Precipitação Provável

Precipitação provável ou dependente (PD), para análise das demandas de irrigação complementar, quando da elaboração de projetos,

corresponde à precipitação mensal com certa probabilidade de ser igualada ou superada (probabilidade de excedência) de acordo com a distribuição de probabilidades ajustada à série observada.

A variabilidade das precipitações mensais, implica numa variação da precipitação efetiva, definida a seguir, e das necessidades de irrigação. Um perímetro de irrigação não pode ser planejado com base no valor mínimo da precipitação mensal. Isto o levaria a ser, na maioria dos anos, um projeto antieconômico. Por outro lado, não pode basear-se na precipitação mensal média, pois isto levaria o projeto a trabalhar satisfatoriamente em apenas metade do tempo, aproximadamente. Por conseguinte, o valor da precipitação provável deve ser calculado com base em critérios técnicos-econômicos.

A probabilidade é fixada em função de certas considerações como prognósticos de rendimento, custo do sistema e benefícios financeiros. Para um cultivo de alta rentabilidade, como as hortaliças, por exemplo, o cálculo das necessidades de água pode basear-se na precipitação ocorrida em nove de cada dez anos, isto é, 90% de probabilidade de ocorrência com 10% de risco de não ocorrência. Por outro lado, para um cultivo de pouco valor, pastagem, por exemplo, pode ser adequado utilizar-se a precipitação provável com 50% de probabilidade de ocorrência.

De um modo geral, adota-se uma probabilidade de 75% de ocorrência, conforme FAO (1974, 1977), implicando numa falha com chance de 25%, ou seja, de que a cada quatro anos, em média, em três anos serão atendidas as necessidades de água da cultura.

O cálculo da precipitação provável mensal, com 75% de probabilidade (PD) de ocorrência, pode ser feito, por simplicidade computacional, através da equação de Hazen, conforme FAO (1974, 1977).

Maiores detalhes sobre o método proposto ou o emprego de método mais preciso, podem ser encontrados em FAO (1974, 1977), BENJAMIN & CORNELL (1970) e outros autores.

Como a finalidade desse estudo é simular a derivação de água para irrigação em perímetros implantados e em funcionamento, e não estimar,

à nível de projeto, as demandas necessárias, admitiu-se como precipitação provável a ocorrida na região.

3.1.4- Precipitação Efetiva

Existem, segundo FAO (1974), várias definições para a precipitação efetiva, sem contudo, ser encontrada nenhuma que abranja totalmente a utilização direta ou indireta da chuva pela cultura. Para um melhor entendimento da definição proposta pela FAO (1974) apresenta-se na figura (III.1) e nos parágrafos seguintes, a descrição das possíveis trajetórias das águas de chuva.

Antes que a chuva atinja a superfície da terra existe uma parcela, representada na figura (III.1) pelo retângulo (A), que é evaporada na atmosfera. Esta parcela que nunca é medida aumenta a umidade do ar e diminui sua temperatura o que implica em reduzir a evapotranspiração dos cultivos. O vapor d'água pode ainda ser transportado pelo vento e influenciar as características do espaço circundante. Esta fração é portanto parcialmente útil mas não é levada em conta em nenhum cálculo.

A chuva pode ser interceptada pela vegetação (retângulo B) com volume elevado no início da chuva e menor ao passar do tempo. Parte pode ser absorvida e ficar retida nas folhas perdendo-se a seguir por evaporação (B1). A outra parte cai das folhas sobre a superfície do solo, representada por (B2). As parcelas (B1) e (B2), que são medidas na precipitação total recebida, são úteis para o crescimento do cultivo porque reduzem a transpiração e aumentam a umidade do solo. Quando as chuvas são de alta intensidade e pequena duração normalmente toda a precipitação fica interceptada pela vegetação. Em muitos estudos estas precipitações são erroneamente consideradas inúteis ao cultivo.

Ao atingir a superfície do solo (retângulo C) parte da água infiltra-se (C2), parte fica retida em depressões (C3), e outra pode escoar superficialmente (C1). Os fatores que influenciam na infiltração e no escoamento superficial são vários e se interrelacionam.

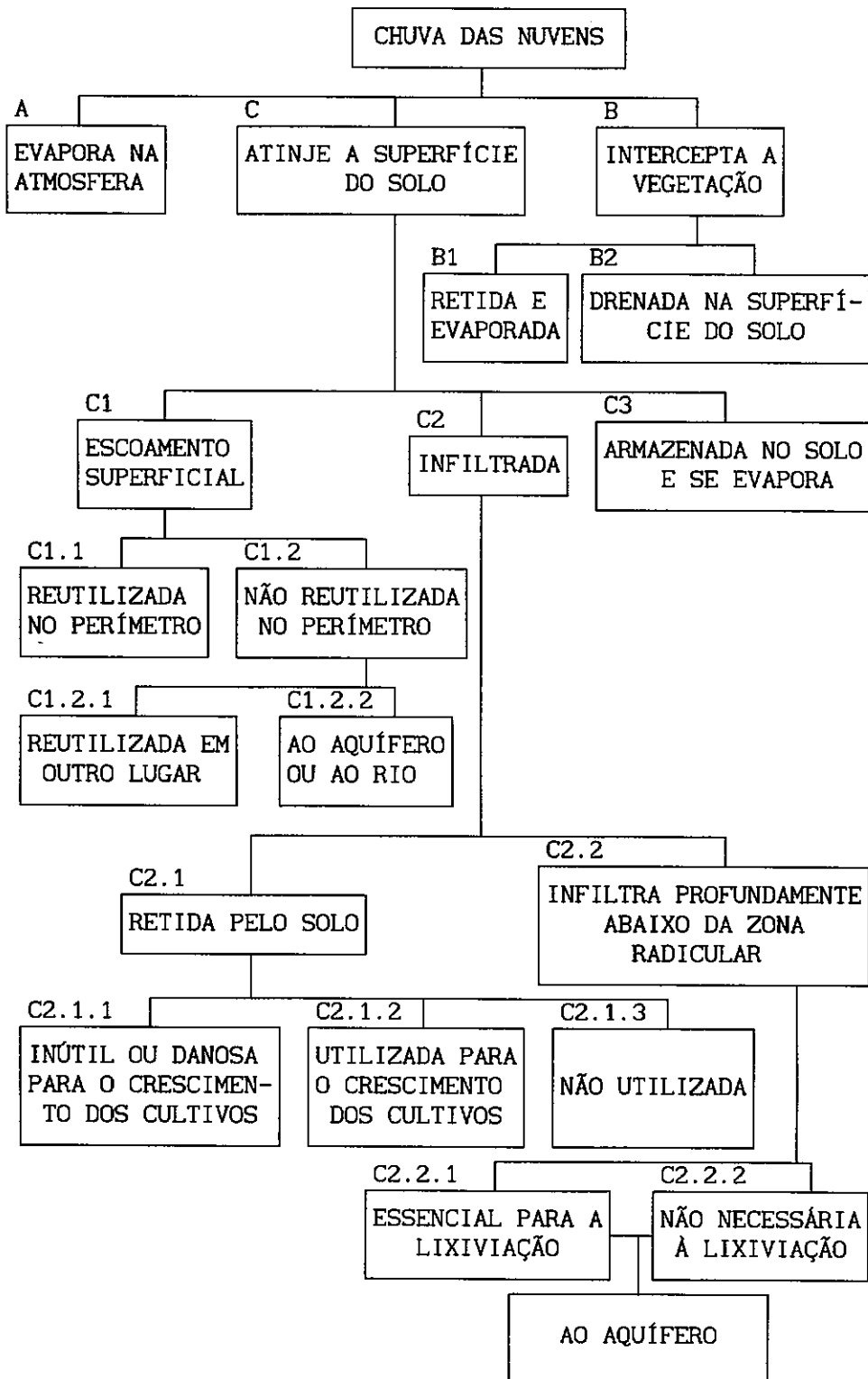


FIGURA (III.1) - TRAJETÓRIA DAS ÁGUAS DE CHUVA

A água que escoar superficialmente pode ser bombeada e novamente utilizada no lugar onde se precipitou (C1.1), podendo ser utilizada em outro local (C1.2.1), alimentar um rio ou um aquífero num ponto a jusante (C1.2.2). No planejamento geral do aproveitamento dos recursos hídricos esta última parte do escoamento superficial, é sempre considerado como integrante das chuvas eficazes.

Parte da água da chuva fica retida no solo em depressões (C3), perdendo-se progressivamente por evaporação e infiltração, podendo ser útil para satisfazer as necessidades de água das culturas; entretanto, pode, ser danosa e constituir problemas de drenagem superficial.

Parte da água que se infiltra no solo (C2) ficará armazenada na zona radicular (C2.1), e outra poderá infiltrar-se mais profundamente (C2.2). Uma parte da água armazenada no solo (C2.1) pode ser ineficaz quando as precipitações ocorrem no período não vegetativo; estas podem ser danosas, mesmo no período vegetativo, durante o período de crescimento, provocando atrasos na colheita, queda do rendimento e da qualidade dos produtos. A água inútil ou danosa (C2.1.1) equivale a uma precipitação não utilizada pelo cultivo. A água armazenada na zona radicular, tem parte realmente utilizada pelo cultivo, atendendo à evapotranspiração real ou sob qualquer outra forma (C2.1.2). Uma terceira possibilidade é a água armazenada não ser utilizada pelo cultivo, por ter acabado a colheita, porém o aumento da umidade do solo, pode ser ou não útil para a próxima temporada (C2.1.3).

A água pode perder-se mais abaixo da zona radicular por infiltração profunda (C2.2). Certa fração dessa água perdida por infiltração profunda é inclusive essencial, nas regiões áridas e semiáridas, para lixiviar os sais (C2.2.1), sendo portanto uma parcela útil. Se não há nenhum problema de salinidade, toda água que se perde por infiltração profunda abaixo da zona radicular pode ser útil na alimentação do aquífero (C2.2.2).

A definição da precipitação efetiva dada por Hershfield, conforme FAO (1974), considera-a como parte das precipitações totais que caem ao longo do período de crescimento das culturas, e que estarão disponíveis para satisfazer as necessidades das plantas. Essa definição é restritiva na medida que inclui necessidades especiais, tais como, preparo dos solos, subsidência e lixiviação. Do ponto de vista da produção, a FAO (1974) definiu a precipitação efetiva como sendo a parte da chuva, no período analisado, que é útil direta ou indiretamente à produção do cultivo. Inclui-se nesta definição a água interceptada pela vegetação viva ou seca (B), a que se perde por evaporação na superfície do solo (C3), a precipitação perdida por

evapotranspiração durante o crescimento (C2.1.2) e a parte que contribui com a lixiviação por infiltração profunda (C2.2.1). A precipitação efetiva pode ser formulada pela seguinte equação:

$$PE = (B) + (C2.1.2) + (C2.2.1) + (C3) \quad (III.15)$$

A parte da precipitação não utilizada pela cultura é a parte que perde-se por escoamento superficial (C1), por infiltração profunda desnecessária (C2.2.2) e por constituir a umidade remanescente no solo depois da colheita (C2.1.3), quando não útil para a temporada seguinte.

Não se inclui na definição de precipitação efetiva outros efeitos indiretos, tais como, a redução da temperatura, o aumento da umidade relativa e seu efeito advectivo em zonas secas circunvizinhas.

Muitos são os métodos empíricos e os derivados de fórmulas disponíveis para o cálculo da precipitação efetiva. Pode-se consultar FAO (1974) para obtenção de informações detalhadas, sobre as vantagens e as desvantagens de cada método ou fórmula. Neste trabalho utilizou-se o método do Soil Conservation Service (SCS), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, indicado pela FAO (1974, 1977), como um dos mais precisos e recomendados para regiões áridas e semiáridas.

O método do SCS foi efetuado, através de uma análise ampla, examinando-se cinquenta anos de registros de precipitações em vinte e duas estações experimentais representativas de diversas condições climáticas e edafológicas. O balanço de umidade do solo foi feito diariamente, somando-se ao balanço do dia anterior a precipitação efetiva e a irrigação complementar, subtraindo-se deste o consumo de água do cultivo. Os valores da precipitação efetiva são calculados através da tabela (III.3), extraída de FAO (1974), em função da precipitação provável e da evapotranspiração real do cultivo a nível mensal. A tabela (III.3) foi elaborada pelo SCS, baseado em uma lâmina de irrigação de três polegadas ou 75 mm, equivalente à capacidade de armazenamento do solo na zona radicular, no momento da rega. O método prevê um coeficiente corretivo quando são utilizadas outras lâminas líquidas de rega, correspondendo a diferentes capacidades de armazenamento do solo, conforme quadro número oito da publicação da FAO (1974).

Neste trabalho a lâmina líquida de rega foi admitida constante e igual ao valor tabelado. Esta hipótese foi considerada por ser a precipitação efetiva calculada para grandes áreas, com precipitação provável e evapotranspiração homogêneas, cada uma englobando vários perímetros de irrigação, implantados em solos de estruturas e extensões diversas. Numa situação típica deve-se fazer um cálculo ponderado da precipitação efetiva em função da área e do grupo ou associação de solo predominante no perímetro irrigado.

PRECIPITAÇÃO PROVÁVEL MENSAL EM MILÍMETROS	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM MILÍMETROS													
	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	250,0	275,0	300,0	325,0	350,0
12,5	7,5	8,0	8,7	9,0	9,2	10,0	10,5	11,2	11,7	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
25,0	15,0	16,2	17,5	18,0	18,5	19,7	20,5	22,0	24,5	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
37,5	22,5	24,0	26,2	27,5	28,2	29,2	30,5	33,0	36,2	37,5	37,5	37,5	37,5	37,5
50,0	25,0	32,2	34,5	36,7	39,0	40,5	43,7	47,0	47,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
62,5	25,0	39,7	42,5	44,5	46,0	48,0	50,5	53,7	57,5	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
75,0	25,0	46,2	49,7	52,7	55,0	57,5	60,2	63,7	67,5	73,7	75,0	75,0	75,0	75,0
87,5	25,0	50,0	56,7	60,2	63,7	66,0	69,7	73,7	77,7	84,5	87,5	87,5	87,5	87,5
100,0	25,0	50,0	63,7	67,7	72,0	74,2	78,7	83,0	87,7	95,0	100,0	100,0	100,0	100,0
112,5	25,0	50,0	70,5	75,0	80,2	82,5	87,2	92,7	98,0	105,0	111,0	112,5	112,5	112,5
125,0	25,0	50,0	75,0	81,5	87,7	90,5	95,7	102,0	108,0	115,0	121,0	125,0	125,0	125,0
137,5	25,0	50,0	75,0	88,7	95,2	98,7	104,0	111,0	118,0	126,0	132,0	137,5	137,5	137,5
150,0	25,0	50,0	75,0	95,2	102,0	106,0	112,0	120,0	127,0	136,0	143,0	150,0	150,0	150,0
162,5	25,0	50,0	75,0	100,0	109,0	113,0	120,0	128,0	135,0	145,0	153,0	160,0	162,5	162,5
175,0	25,0	50,0	75,0	100,0	115,0	120,0	127,0	135,0	143,0	154,0	164,0	170,0	175,0	175,0
187,5	25,0	50,0	75,0	100,0	121,0	126,0	134,0	142,0	151,0	161,0	170,0	179,0	185,0	187,5
200,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	133,0	140,0	148,0	158,0	168,0	178,0	188,0	196,0	200,0
225,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	144,0	151,0	160,0	171,0	182,0				
250,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	161,0	170,0	183,0	194,0				
275,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	171,0	181,0	194,0	205,0				
300,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	190,0	203,0	215,0				
325,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	198,0	213,0	224,0				
350,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	220,0	232,0				
375,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	240,0				
400,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	247,0				
425,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	250,0				
450,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	175,0	200,0	225,0	250,0				

TABELA (III.3) - PRECIPITAÇÃO EFETIVA MENSAL EM MILÍMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS).

3.2- FATORES AGRÍCOLAS

3.2.1- Plano Cultural

Na elaboração de um plano cultural, também chamado de calendário agrícola ou plano agrícola, um dos aspectos mais importantes é a escolha das culturas a serem utilizadas. Os agrônomos ou projetistas em irrigação observam vários aspectos na escolha das culturas que irão formar o plano cultural, tais como, a adaptação da cultura ao clima local, as máquinas e implementos agrícolas necessários e os já existentes na propriedade, a mão-de-obra, a rentabilidade e a comercialização.

A elaboração de um plano cultural é portanto uma atividade dinâmica, dependente do local do projeto, da época de implantação e principalmente da experiência do projetista no que se refere a escolha do que, quanto e quando plantar.

3.2.2- Coeficiente de Cultura Médio

Calculada a evapotranspiração potencial (ETP), têm-se que estimar a evapotranspiração real (ETR) para o local de projeto em função do plano cultural estabelecido. A ETR é calculada pelas equações (III.13) e (III.14), produto da ETP por um coeficiente representativo das diferentes culturas existentes no perímetro irrigado. Este coeficiente, chamado coeficiente de cultura médio (K_c), depende, segundo MAFRA (1987) da superfície foliar de cada cultura, que é função do genótipo, estágio de desenvolvimento, condições nutricionais e sanitárias, população de plantas e das condições do solo e clima.

De uma maneira geral, o coeficiente de cultura varia ao longo do ciclo vegetativo da planta. Esta variação pode ser representada pela curva da figura (III.2). No início da vida da planta (estágio I) em que o crescimento é lento, com sistema radical ainda pouco desenvolvido e pouca cobertura foliar no solo o valor de K_c é pequeno. No período de maior crescimento (estágio II) e na fase produtiva (estágio III) da

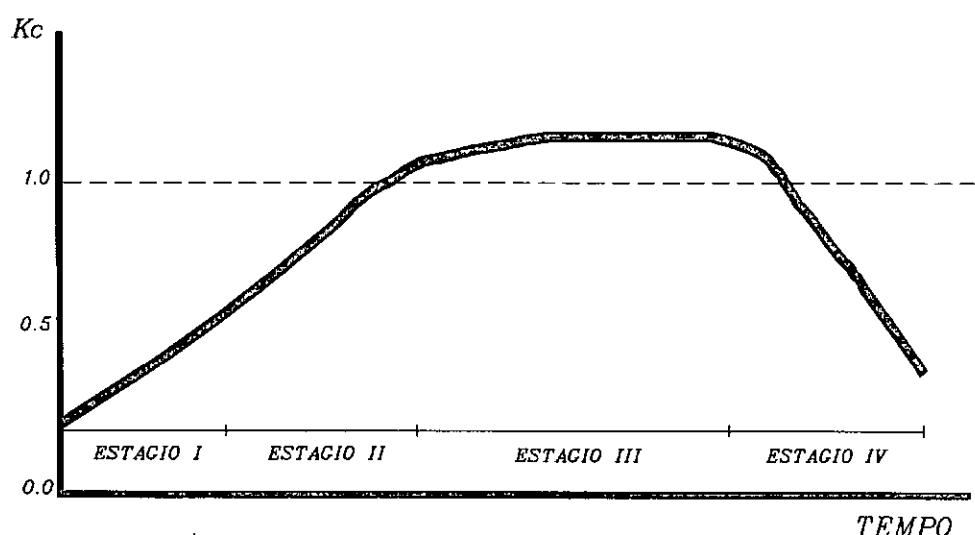


FIGURA (III.2) - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTURA PARA CULTIVOS TEMPORÁRIOS

planta os valores de K_c crescem, atingindo, para certas culturas, valores superiores à unidade. Isto significa que em função de sua superfície foliar a cultura apresenta um valor de evapotranspiração superior ao da grama Batatais, ambas submetidas às mesmas condições de solo e clima. Na fase de maturação da planta (estágio IV) os valores de K_c tendem a declinar.

Na literatura especializada são encontradas estimativas do K_c para diferentes fases da vida da planta de diversas espécies cultivadas. Na ausência de pesquisa local têm sido utilizados os valores de K_c

encontrados nas publicações FAO (1977, 1979), com tabelas de valores dos K_c , em função do estágio de desenvolvimento das diversas culturas, condições de umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Os valores dos coeficientes de cultura K_c , relacionados nessas tabelas, permitem identificar pequenas variações entre diferentes espécies de culturas. Com exceção dos valores dos coeficientes correspondentes à cultura do arroz, que em qualquer estágio de desenvolvimento da planta é sempre superior ao da grama Batatais, os demais mantêm valores relativamente próximos.

3.2.3- Área Efetivamente Irrigada

A elaboração de projetos de irrigação, normalmente emprega cálculos das necessidades mensais de água em função do plano cultural estabelecido e da área total disponível no perímetro. Tal procedimento leva o projeto a ficar na maioria das vezes superdimensionado, pois, verifica-se que a área efetivamente ocupada pelas culturas é geralmente bem inferior à disponível. Este fato pode ser observado através dos boletins emitidos anualmente pela CODEVASF quando do levantamento de dados de acompanhamento e coleta de índices de operação e manutenção dos perímetros de irrigação sob sua responsabilidade, ver tabela (IV.12) e figura (IV.7).

A relação entre as áreas efetivamente ocupada e aquela disponível, denominada coeficiente de ocupação da área cultivada (COAC) tem, segundo o PLANVASF (1988), um valor ideal da ordem de setenta e cinco por cento.

3.2.4- Eficiências e Coeficiente de Retorno

No planejamento de um projeto de irrigação uma das maiores incógnitas está na escolha dos índices de eficiência, a serem admitidos no cálculo da vazão de água a ser derivada.

O movimento da água através do sistema de irrigação, desde a captação até o campo, pode ser subdividido em três etapas: condução, distribuição e aplicação no campo. A condução é o movimento verificado da fonte através de canais ou condutos principais e secundários até os canais ou condutos de distribuição, que dominam todos os setores do perímetro. A distribuição compreende o movimento da água nos canais ou condutos terciários e quartenários até à parcela ou lote, e a aplicação o movimento da água a nível de campo ou da cultura. As eficiências do uso da água em cada uma dessas operações são definidas a seguir.

A eficiência de condução E_c é a eficiência do canal ou conduto desde o reservatório, a derivação do rio ou a estação de bombeamento, até o início do sistema de distribuição, e pode ser expressa por:

$$E_c = \frac{V_d + V_2}{V_c + V_1} \quad (\text{III.16})$$

onde:

V_c - volume derivado ou bombeado do rio em m^3 .

V_d - volume desviado pelo sistema de distribuição em m^3 .

V_1 - afluxo de outras fontes em m^3 .

V_2 - volume desviado na condução para outros fins em m^3 .

A eficiência de distribuição E_d é a eficiência dos canais e condutos de distribuição na condução da água desde os canais principal e secundário até os pontos de aplicação nos perímetros de irrigação sendo expressa por:

$$E_d = \frac{V_f + V_3}{V_d} \quad (\text{III.17})$$

onde:

V_f - volume de água fornecido aos perímetros em m^3 .

V_3 - volume desviado da distribuição para outros fins em m^3 .

A eficiência de aplicação E_a é a relação entre a quantidade de água fornecida ao solo e a necessária para manter a umidade do solo no nível requerido pela cultura. Esta é uma maneira indireta de estabelecer-se a eficiência de aplicação, desde que a água usada pela evapotranspiração real da cultura é igual a quantidade de água necessária para manter a umidade do solo requerida pela cultura. Esta eficiência é expressa como:

$$E_a = \frac{V_m}{V_f} \quad (III.18)$$

onde V_m é o volume de água necessário em m^3 .

A eficiência total ou de projeto E_t pode ser definida como a eficiência verificada na condução total desde o desvio do rio ou outra fonte até a zona radicular da cultura, sendo representada pela expressão:

$$E_t = \frac{V_m + V_2 + V_3}{V_c + V_1} \quad (III.19)$$

Como normalmente os valores de V_1 , V_2 e V_3 são desprezíveis quando comparados à V_a e V_m pode-se afirmar que a eficiência total é o produto das eficiências de condução, distribuição e aplicação.

$$E_t = E_c \cdot E_d \cdot E_a \quad (III.20)$$

Valores indicativos destas eficiências podem ser encontrados tabelados na publicação da FAO (1982), a partir de levantamento em noventa e uma áreas de irrigação implantadas em diversas partes do mundo, levantando informações sobre topografia das áreas, clima, solo, tipos de culturas e estruturas social e organizacional, tentando estabelecer relações entre cada um desses parâmetros e as eficiências

verificadas na condução, distribuição e aplicação.

Parte da água captada de um rio para irrigação retorna por escoamento superficial e subsuperficial. Esta parcela pode ser calculada como uma percentagem da vazão captada através de um coeficiente chamado coeficiente de retorno C_r . Não conseguimos obter informações que permitissem o cálculo desse coeficiente.

IV- METODOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS DOS FATORES INTERVENIENTES NO CÁLCULO DA VAZÃO DERIVADA PARA IRRIGAÇÃO

4.1- DEMANDAS DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

4.1.1- Evapotranspiração Potencial (ETP)

O cálculo das demandas de água para irrigação na região objeto deste estudo, requer a disponibilidade de valores mensais da evapotranspiração potencial, e tendo em vista a extensão da região estudada, deve-se tentar regionalizar ETP, pelo menos em áreas homogêneas.

Sendo este trabalho aplicado ao subsistema CHESF, integrante do sistema hidrelétrico interligado do Norte/Nordeste, utilizou-se para geração das séries sintéticas de ETP os valores determinados para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, através da regionalização feita pelo PLANVASF (1988). A bacia foi dividida em dez áreas homogêneas de ETP conforme a figura (IV.1). Estas áreas foram determinadas a partir do traçado das linhas de mesma ETP, calculadas pelo método de Hargreaves, com valores compreendidos entre 1500 mm e 2100 mm e subdivisões de 100 mm.

A tabela (IV.1), extraída do trabalho do PLANVASF (1988), contém os valores das ETPs mensais médias para cada área homogênea. Estes valores foram calculados, adotando-se a média interanual dos totais mensais de ETP das estações climatológicas que possuíam registros mais coerentes dentro de cada uma das áreas homogêneas. Como os dados mensais das ETPs dos diversos postos climatológicos utilizados não se encontravam disponíveis no referido trabalho, resolveu-se adotar para os coeficientes de variação e de autocorrelação mensais, os valores encontrados para a série histórica (1965 a 1985) de ETP do posto climatológico de Cabrobó - PE, defasando-se estes valores ao longo dos meses para manter o efeito sazonal da evapotranspiração potencial. As ETPs do posto de Cabrobó foram calculadas pelo método de Hargreaves, em

função dos dados de temperatura e umidade relativa, disponíveis no período acima mencionado.

O posto climatológico de Cabrobó - PE foi escolhido para servir de base à geração das séries sintéticas de toda bacia, por pertencer à bacia hidrográfica do rio São Francisco, área homogênea número (V) da figura (IV.1), e ter, segundo CHESF (1986), dados classificados como de boa qualidade, e em número suficiente, para estimativas dos parâmetros e, por último; segundo o trabalho do PLANVASF (1988), ETP é o fator que menos varia ao longo do tempo no cálculo das demandas de água para irrigação.

ÁREA	M E S E S												TOTAL ANUAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
I	151	130	123	101	91	82	93	119	149	174	149	144	1506
II	158	133	134	114	109	100	114	137	165	193	164	154	1675
III	181	157	156	135	126	114	122	146	172	203	183	174	1869
IV	165	146	142	118	102	90	95	118	145	174	163	163	1621
V	203	178	177	152	141	123	128	160	175	204	206	206	2053
VI	209	184	189	163	150	134	140	159	178	205	206	210	2127
VII	190	164	160	134	128	110	119	146	169	198	200	208	1926
VII	185	165	161	129	105	89	93	117	149	186	190	194	1763
IX	183	161	159	126	100	82	86	107	137	139	184	187	1651
X	212	188	190	146	109	84	85	99	133	183	202	210	1841

TABELA (IV.1) - MÉDIAS MENSAIS DAS ETPs DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, EM MILÍMETROS.

A tabela (IV.2) apresenta os valores estimativos das médias, desvios padrão, coeficientes de variação e coeficientes de autocorrelação mensais para o posto climatológico de Cabrobó - PE. Pode-se verificar a semelhança dos valores das médias mensais calculadas por este autor e os da região homogênea número (V) da tabela (IV.1) à qual pertence o referido posto.

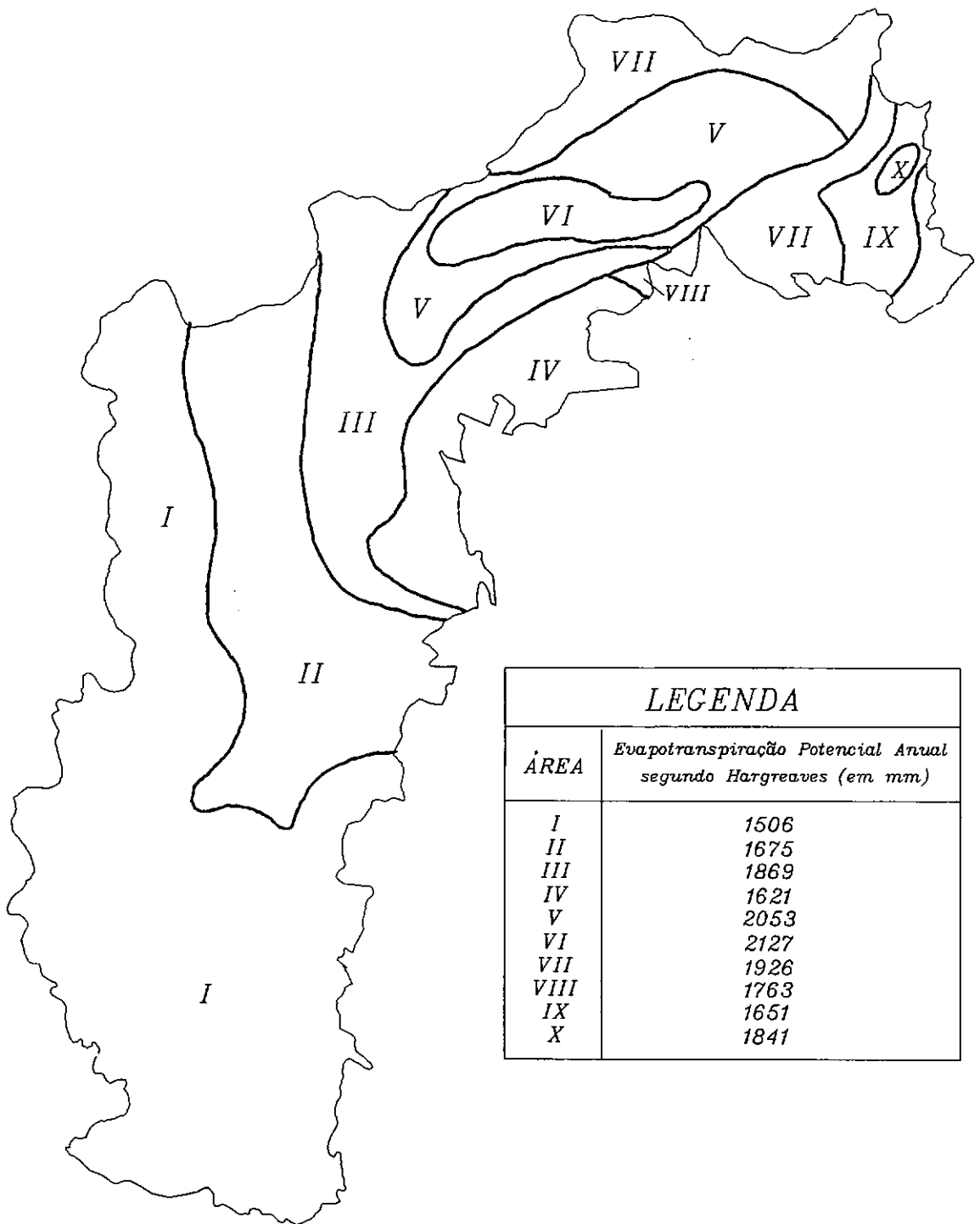


FIGURA (IV.1) – ÁREAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO

MESES	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEF. DE VARIAÇÃO	COEF. DE AUTOCOR- RELAÇÃO ORDEM 1
1	205,03	4,89	0,0238	-0,048
2	177,59	10,10	0,0568	0,579
3	185,88	11,02	0,0593	0,426
4	156,80	12,52	0,0798	0,543
5	146,10	7,82	0,0536	0,562
6	130,66	7,80	0,0597	0,658
7	137,26	5,62	0,0409	0,659
8	157,40	2,51	0,0160	0,449
9	177,01	3,03	0,0171	0,652
10	202,01	4,58	0,0227	0,150
11	204,73	4,84	0,0237	0,281
12	209,29	7,89	0,0377	0,130
TOTAL	2089,76	-----	-----	-----
MÉDIA	174,15	6,89	0,0409	0,420

TABELA (IV.2) - PARÂMETROS DAS ETPs. MENSAIS DO POSTO CLIMATOLÓGICO
DE CABROBÓ - PE.

Como não haviam dados de ETP disponíveis nas regiões homogêneas, não foi possível ajustar uma distribuição de probabilidade para esse parâmetro. Optou-se por escolher a distribuição normal como representativa da ETP.

Para cada área homogênea foi gerada uma série sintética com cem anos de ETP mensal através do modelo Thomas-Fiering, descrito em KELMAN (1987) e representado pela equação:

$$M_{\tau+1,t} = \hat{\mu}_{\tau+1} + \frac{\hat{\rho}_{\tau} \cdot \hat{\sigma}_{\tau+1}}{\hat{\sigma}_{\tau}} \cdot \left(M_{\tau,t} - \hat{\mu}_{\tau} \right) + \hat{\sigma}_{\tau+1} \cdot \sqrt{1 - \hat{\rho}_{\tau}^2} \cdot Z_{\tau+1,t} \quad (\text{IV.1})$$

onde:

$M_{\tau,t}$ - evapotranspiração gerada do mês τ , ano t .

$\tau = 1, 2, \dots, 12$ é o índice do mês.

$t = 0, 1, 2, \dots, 100$ é o índice do ano.

$\hat{\mu}_{\tau}$ - estimativa da média da ETP do mês τ .

$\hat{\sigma}_{\tau}$ - estimativa do desvio padrão da ETP do mês τ .

$\hat{\rho}_{\tau}$ - estimativa do coeficiente de autocorrelação da ETP do mês τ .

$Z_{\tau,t}$ - a componente independente padrão.

Adotou-se a convenção circular de que, se $\tau = 12$, então:

$$M_{\tau+1,t} = M_{1,t+1}, \quad \mu_{\tau+1} = \mu_1, \quad \sigma_{\tau+1} = \sigma_1 \quad (\text{IV.2})$$

Para início da simulação ($t = 0$) foram adotados os valores médios mensais das ETPs de Hargreaves constantes da tabela (IV.1).

Em todas as séries sintéticas geradas neste trabalho as estimativas da média, do desvio padrão e do coeficiente de autocorrelação foram determinadas pelo método dos momentos cujas equações podem ser encontradas na documentação clássica que trata de probabilidade e estatística.

4.1.2- Precipitação

De maneira semelhante à evapotranspiração potencial, necessita-se ter disponível um estudo de regionalização dos dados históricos de precipitação para o local onde serão geradas as séries sintéticas correspondentes.

Adotou-se a regionalização apresentada pelo PLANVASF (1988), feita

a partir do mapa de isoietas anuais e do zoneamento climatológico elaborado pelo método de Thornthwaite em PLANVASF (1986a). Foram definidas treze áreas de precipitações homogêneas, conforme a figura (IV.2).

Os valores das precipitações médias mensais, dos desvios padrão e dos coeficientes de autocorrelação dos postos pluviométricos, contidos em cada área homogênea, são apresentados, respectivamente, nas tabelas (IV.3), (IV.4) e (IV.5).

Como a distribuição normal não se revelou adequada aos dados de precipitação (rejeição de todos os casos, de acordo com o teste qui-quadrado, nível de significância de 5%), adotou-se a distribuição log-normal de 3 parâmetros, que revelou ajustes satisfatórios.

Foi gerada uma série sintética com cem anos de precipitação mensal para cada área homogênea através do modelo de Thomas-Fiering, descrito anteriormente na seção (4.1.1).

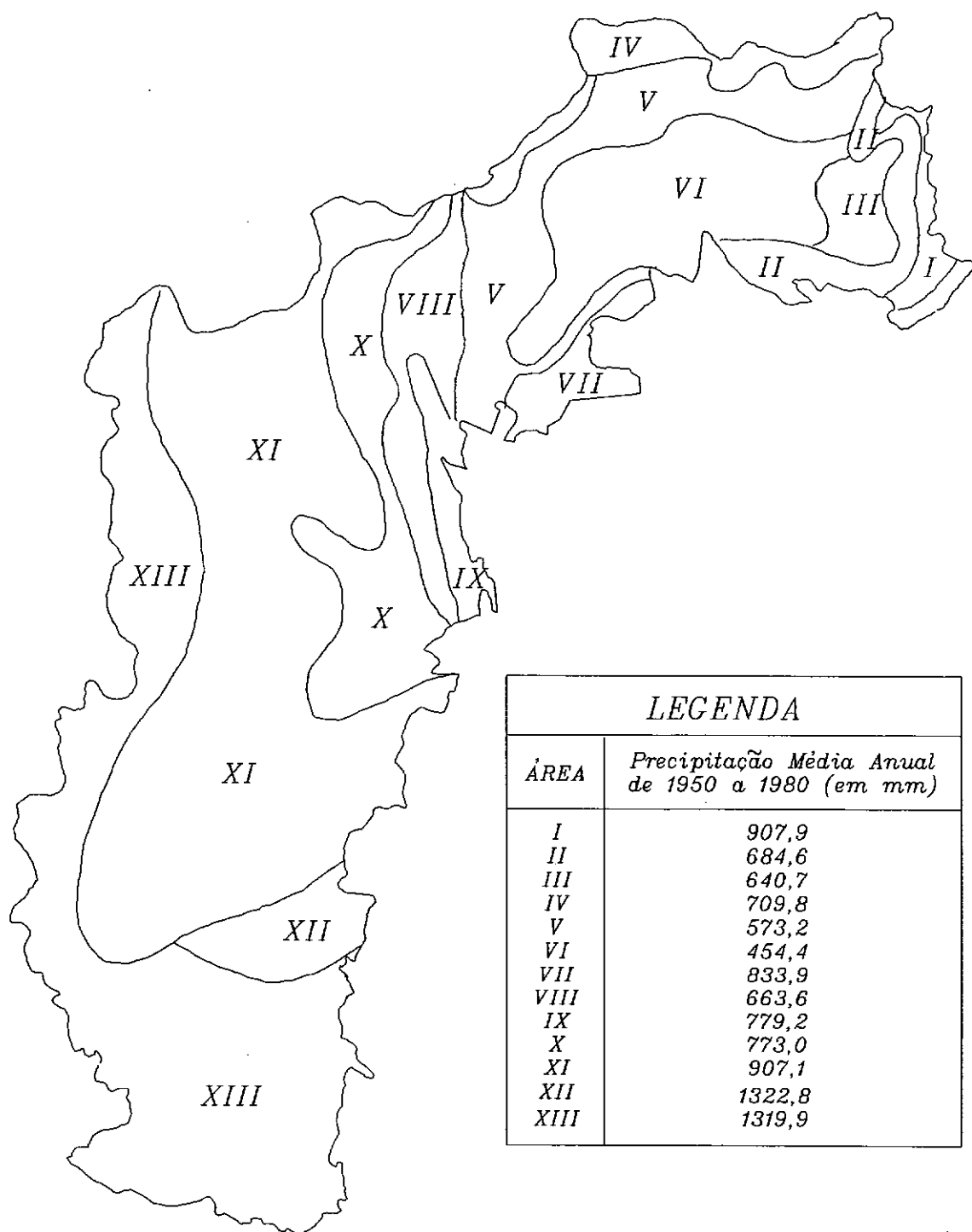


FIGURA (IV.2) – ÁREAS HOMOGÊNEAS DE PRECIPITAÇÃO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO

ÁREA HOMOGENEA	M E S												TOTAL
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANUAL
I	42,3	49,9	89,7	116,9	143,0	135,9	123,1	75,0	45,7	26,3	24,1	36,1	907,9
II	40,2	42,0	73,1	84,6	101,5	100,9	88,1	49,0	28,3	16,7	24,3	35,9	684,6
III	42,7	43,6	68,3	71,5	100,8	89,7	86,4	40,7	23,9	12,6	23,8	36,7	640,7
IV	85,4	117,5	163,5	116,8	54,0	33,9	25,2	8,8	7,8	13,7	31,3	51,9	709,8
V	82,9	85,6	119,5	73,7	26,8	16,2	11,4	4,8	5,6	17,8	55,1	73,8	573,2
VI	61,6	62,4	88,9	57,4	27,1	21,6	17,9	7,7	6,5	12,5	38,7	52,2	454,4
VII	87,5	52,2	106,0	80,4	63,7	63,5	58,6	43,5	26,2	33,9	89,7	95,6	833,9
VIII	112,3	97,1	94,1	58,2	6,7	1,1	1,3	0,5	6,8	35,4	118,3	131,8	663,6
IX	107,6	93,4	87,5	68,7	24,0	23,1	22,8	11,8	15,1	51,6	138,8	134,8	779,2
X	133,5	106,4	98,4	53,5	6,4	1,5	1,0	0,9	7,0	49,2	150,3	164,9	773,0
XI	146,1	127,6	115,5	64,6	10,8	2,1	1,5	0,8	12,0	63,5	170,2	192,6	907,1
XII	229,4	163,5	146,0	66,5	21,1	5,9	7,0	2,0	36,3	106,1	229,2	309,9	1322,8
XIII	246,1	184,5	140,5	59,5	30,6	11,7	11,7	7,0	35,6	116,5	210,2	265,9	1319,9

TABELA (IV.3) - PRECIPITAÇÃO MENSAL PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO EM MILÍMETROS.

ÁREA HOMOGÊNEA	M E S											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
I	27,1	38,9	54,3	61,1	58,4	51,4	51,2	32,8	28,7	25,4	25,5	45,8
II	30,2	38,2	60,1	52,3	51,3	42,1	40,7	24,7	20,6	20,5	25,0	38,4
III	31,8	33,8	57,0	46,6	47,2	42,5	48,7	25,4	20,2	13,8	27,6	45,8
IV	41,0	51,6	91,1	58,7	34,5	20,2	20,4	10,1	8,4	15,5	28,2	40,0
V	51,6	49,0	80,8	48,9	18,7	8,8	11,7	5,1	7,0	18,1	30,5	45,8
VI	44,7	42,8	72,3	48,2	16,4	12,5	12,4	5,5	7,2	15,9	27,1	38,2
VII	65,6	68,9	82,1	51,7	36,2	32,9	23,5	25,5	20,0	32,3	52,5	63,8
VIII	82,1	62,2	72,7	44,8	8,0	2,0	2,8	1,6	8,9	28,0	50,8	75,1
IX	79,4	74,8	68,3	46,7	19,7	13,3	10,9	6,8	16,1	36,0	67,2	72,1
X	95,9	73,1	80,9	38,2	8,3	2,3	0,9	1,6	7,4	37,8	66,9	76,1
XI	97,2	78,7	74,3	39,5	10,6	4,7	2,5	1,3	11,6	44,1	67,1	75,3
XII	148,4	94,0	103,6	43,3	23,0	17,7	15,4	4,6	31,7	69,1	96,4	171,2
XIII	120,7	93,9	76,7	37,8	27,9	16,4	17,8	9,5	31,4	59,9	65,2	96,7

TABELA (IV.4) - DESVIO PADRÃO DA PRECIPITAÇÃO MENSAL PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO EM MILÍMETROS.

ÁREA HOMOGÊNEA	M E S											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
I	0,144	0,214	0,083	-0,079	0,531	0,432	0,438	0,024	0,031	0,041	-0,079	0,099
II	0,016	0,305	0,153	-0,049	0,514	0,578	0,441	0,167	0,014	0,084	-0,020	-0,049
III	-0,047	0,186	0,065	-0,049	0,466	0,617	0,506	0,079	-0,059	0,130	0,120	-0,184
IV	0,154	0,188	-0,076	0,322	0,526	0,340	0,440	0,300	0,030	0,394	0,063	-0,045
V	0,060	0,131	-0,106	0,087	0,379	0,565	0,531	0,226	-0,055	0,420	0,089	0,082
VI	-0,081	0,131	0,043	0,105	0,325	0,489	0,585	0,096	-0,022	0,503	0,184	-0,053
VII	0,261	0,420	0,067	0,156	0,591	0,536	0,460	0,485	0,259	0,485	0,278	-0,058
VIII	-0,116	0,198	-0,035	-0,078	0,292	0,420	0,125	-0,101	0,137	-0,066	0,133	-0,085
IX	-0,057	0,416	0,059	0,182	0,331	-0,026	0,336	0,274	0,052	0,247	0,196	-0,107
X	-0,074	0,368	0,177	-0,143	0,121	0,455	0,165	-0,012	-0,387	-0,012	0,454	-0,247
XI	-0,085	0,323	0,021	-0,020	0,207	0,594	0,498	-0,082	-0,134	0,084	0,282	-0,170
XII	-0,029	0,421	0,267	-0,194	0,170	0,515	-0,028	-0,105	-0,132	-0,053	0,183	0,364
XIII	-0,257	0,285	0,252	-0,257	0,056	0,231	-0,148	0,268	0,496	0,096	0,157	0,049

TABELA (IV.5) - COEFICIENTE DE AUTOCORRELAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MENSAL PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO.

4.1.3 - Plano Cultural e Coeficiente de Cultura Médio

Nesta fase do trabalho necessita-se ter um ou mais planos culturais, representativos das culturas normalmente utilizadas e respectivas épocas de plantio para a região onde se pretende calcular a vazão derivada para uso em irrigação.

A elaboração de um plano cultural depende de diversos parâmetros e principalmente da experiência do projetista na seleção e quantificação das culturas e respectivas épocas de plantio.

Neste trabalho não foram adotados os planos culturais elaborados pelo PLANVASF (1988), por não serem os mesmos representativos da realidade verificada nos perímetros de irrigação em operação, e nos projetos em implantação.

Naquele trabalho foram admitidas duas safras por ano, cada uma com quatro meses de duração. Foram utilizados somente duas espécies de culturas temporárias: o arroz, por ter o coeficiente de cultura médio superior ao da grama, representando as culturas de alto consumo, e outra cultura fictícia representando os demais tipos de culturas temporárias.

O trabalho do PLANVASF (1988) prevê, portanto, retirada d'água para irrigação em apenas oito meses do ano, prática nunca observada em qualquer dos perímetros de irrigação da bacia do rio São Francisco como pode ser constatado, por exemplo, nos boletins de acompanhamento emitidos pela CODEVASF (1989). Esta contradição deve-se ao fato do PLANVASF não admitir qualquer cultura permanente ou mesmo a hipótese das temporárias serem plantadas fora da época normal, possibilitando sua comercialização nos períodos das entressafras.

Com o objetivo de atenuar a diferença entre a metodologia proposta pelo PLANVASF e a realidade verificada nos projetos e nos perímetros de irrigação em funcionamento, foi utilizado neste trabalho o conjunto de planos culturais do projeto de irrigação do Vale do Banabuiú do município de Morada Nova no Ceará, constante em relatório do DNOCS (1976). O projeto prevê a utilização de dezoito planos culturais,

diferentes em tipos de cultura, épocas de plantio e áreas de ocupação. A partir de consultas feitas a especialistas da área de irrigação e ao Plano Diretor do Vale do São Francisco (PLANVASF - 1986b) constatou-se grande semelhança entre as culturas adotadas pelo projeto de Morada Nova e as implantadas na região de estudo. Outro fator favorável para adoção do projeto neste trabalho foi o fato do mesmo utilizar em seus planos, culturas temporárias e permanentes, tornando-o compatível com as realidades observadas.

Algumas adaptações e correções foram feitas nos planos culturais originais do projeto de Morada Nova com a finalidade de possibilitar o cálculo do coeficiente de cultura médio através das tabelas da FAO (1977) e preservar o limite máximo da área disponível em cada plano. A cultura do mamão foi substituída por duas safras de melão, e na área destinada à livre iniciativa do colono, foi admitida a cultura do arroz. A área total disponível de cada plano cultural foi fixada em um hectare.

Com a finalidade de preservar a tendência de iniciar-se o plantio das culturas temporárias no período chuvoso foi feito um deslocamento dos períodos de plantio dos planos culturais do projeto de Morada Nova ao longo dos meses, adaptando-os assim, às áreas homogêneas de precipitação da bacia hidrográfica do rio São Francisco, de acordo com as tabelas (IV.6) e (IV.7).

Seja o caso da área homogênea III de precipitação onde, conforme a tabela (IV.6), o período chuvoso abrange os meses de fevereiro à julho, diferente da época chuvosa do município de Morada Nova, que corresponde aos meses de dezembro à maio.

Devido a essa diferença corresponderá para essa área III um conjunto (número 2 das tabelas (IV.6 e IV.7)) contendo 18 planos culturais, com épocas de plantio das culturas temporárias diferentes às do conjunto original de Morada Nova.

Um cultivo plantado, por exemplo, em janeiro no conjunto original, mês seguinte ao início do período chuvoso em Morada Nova, será admitido

plantado em março, conforme tabela (IV.7), para o conjunto 2 (área homogênea III de precipitação), correspondente ao mês seguinte do início da época chuvosa da referida área.

ÁREA HOMOGÊNEA DE PRECIPITAÇÃO	PERÍODO CHUVOSO	CONJUNTO DE PLANOS CULTURAIS
I e II	MAR - AGO	1
III	FEV - JUL	2
IV	DEZ - MAI	3
V a XI	NOV - ABR	4
XII e XIII	OUT - MAR	5
MORADA NOVA	DEZ - MAI	ORIGINAL

TABELA (IV.6) - PERÍODO CHUVOSO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO E DO MUNICÍPIO DE MORADA NOVA - CEARÁ.

M Ê S D E P L A N T I O					
PROJETO DE MORADA NOVA	CONJUNTO DE PLANOS CULTURAIS				
	1	2	3	4	5
JAN	ABR	MAR	JAN	DEZ	NOV
MAR	JUL	MAI	MAR	FEV	JAN
JUL	OUT	SET	JUL	JUN	MAI
AGO	NOV	OUT	AGO	JUL	JUN
SET	DEZ	NOV	SET	AGO	JUL
OUT	JAN	DEZ	OUT	SET	AGO
NOV	FEV	JAN	NOV	OUT	SET

TABELA (IV.7) - DESLOCAMENTO DAS ÉPOCAS DE PLANTIO DO PROJETO DE MORADA NOVA.

O cálculo do coeficiente de cultura médio mensal para cada plano cultural foi feito pela média ponderada entre o coeficiente de cultura de cada cultivo e a área ocupada pelo mesmo no mês em questão através da equação:

$$Kc_{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{NC_{\tau}} Kc_{i,\tau} \cdot A_{i,\tau}}{\sum_{i=1}^{NC_{\tau}} A_{i,\tau}} \quad (IV.3)$$

onde:

- Kc_{τ} - coeficiente de cultura médio do mês τ .
- NC_{τ} - número de cultivos do plano cultural no mês τ .
- $Kc_{i,\tau}$ - coeficiente de cultura do cultivo i no mês τ .
- $A_{i,\tau}$ - área ocupada pelo cultivo i no mês τ .

Os coeficientes de cultura e os períodos dos vários estágios de crescimento das culturas do projeto de Morada Nova, foram extraídos dos trabalhos FAO (1977, 1979), e são apresentados na tabela (IV.8).

CULTURAS PERMANENTES	COEFICIENTE K _c MÉDIO
CAPIM	0,85
CITRUS	0,70
BANANA	0,85

CULTURAS TEMPORÁRIAS	COEF. K _c MÉDIO				PERÍODO EM DIAS			
	ESTÁGIOS DE CRESCIMENTO							
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
ARROZ	1,1	1,25	1,3	1,05	70	15	35	30
ALGODÃO	0,5	0,80	1,25	0,90	20	40	50	40
MILHO	0,5	0,85	1,20	0,90	30	40	50	30
TOMATE	0,5	0,80	1,25	0,90	35	40	45	30
FEIJÃO	0,4	0,75	1,05	0,95	20	30	30	10
MELÃO	0,5	0,80	1,05	0,90	15	25	35	15

TABELA (IV.8) - COEFICIENTES K_c E PERÍODOS DE CRESCIMENTO DAS CULTURAS.

4.1.4 - Vazão Unitária

As interseções das áreas homogêneas de precipitação e de evapotranspiração definem as áreas homogêneas de precipitação efetiva. Em cada uma dessas áreas homogêneas de precipitação efetiva deve-se calcular uma série sintética com cem anos de evapotranspiração real através da equação (IV.4).

$$ETR_{\tau,t} = ETP_{\tau,t} \cdot Kc_{\tau,t} \quad (IV.4)$$

onde $ETR_{\tau,t}$ corresponde a evapotranspiração real, $ETP_{\tau,t}$ a evapotranspiração potencial e $Kc_{\tau,t}$ ao coeficiente de cultura médio, relativos ao mês τ do ano t da série sintética gerada.

Para a bacia hidrográfica do rio São Francisco as interseções das áreas homogêneas de precipitação e de evapotranspiração potencial resultaram em quarenta regiões de precipitação efetiva homogênea conforme a tabela (IV.9) e figura (IV.3).

ÁREAS DE PRECIPITAÇÃO	ÁREAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
I								0	1	
II							5	4	3	2
III								7	6	
IV					9		8			
V			15	14	13	12	11	10		
VI			21	20	19	18	17	16		
VII				23				22		
VIII			27	26	25	24				
IX			29	28						
X		34	33	32	31	30				
XI	37	36	35							
XII	38									
XIII	39									

TABELA (IV.9) - ÁREAS HOMOGÊNEAS DE PRECIPITAÇÃO EFETIVA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.

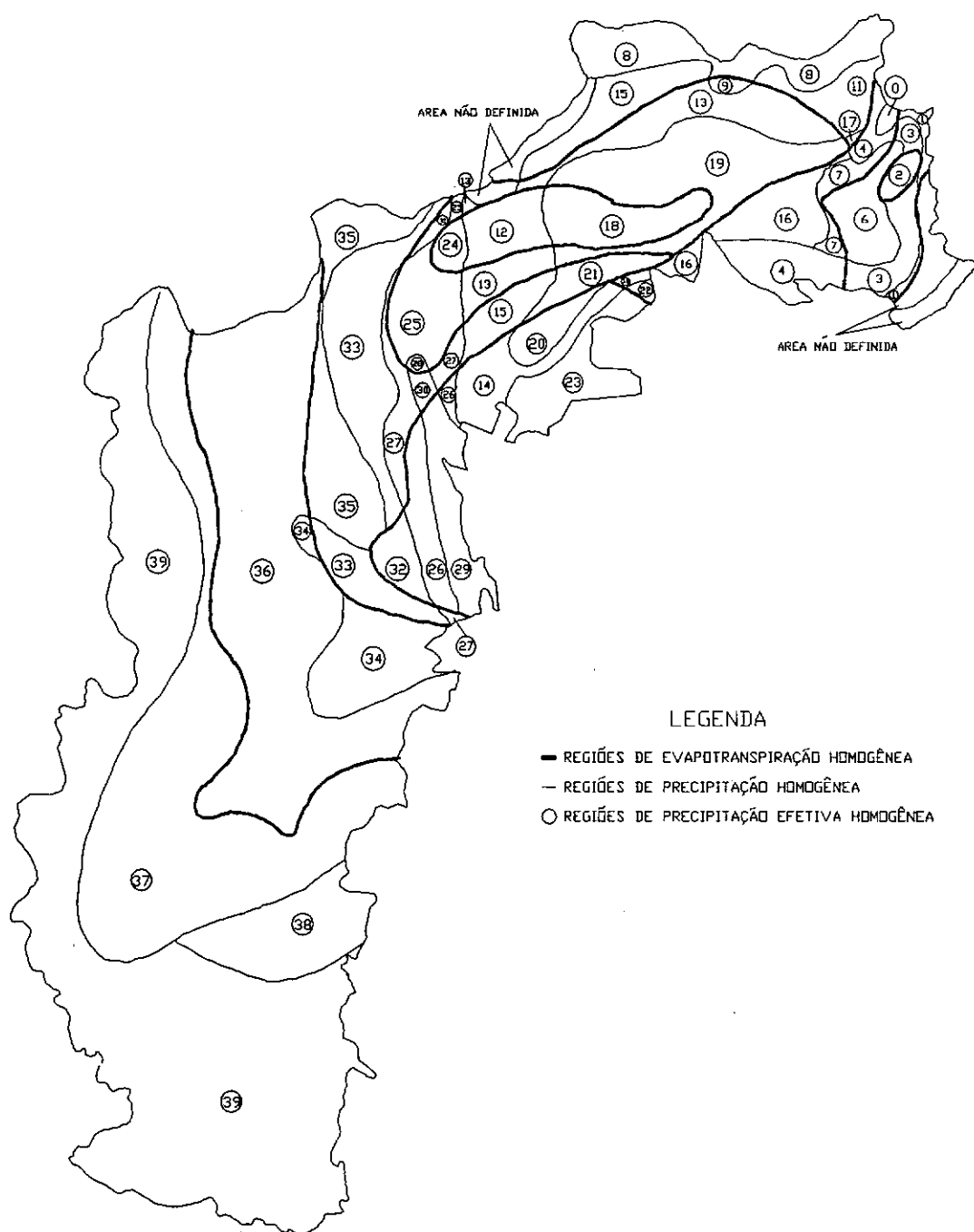


FIGURA (IV.3) - ÁREAS HOMOGÊNEAS DE PRECIPITAÇÃO EFETIVA
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO

Foram geradas para cada região de precipitação efetiva uma série sintética com cem anos de evapotranspiração real através da equação (IV.4). Em cada ano gerado foi sorteado um dos dezoito planos culturais.

Adotou-se para o sorteio do plano cultural o seguinte critério:

- como o projeto original de Morada Nova previa um total de quinhentos e treze lotes a serem beneficiados com a irrigação e, como cada um dos dezoito planos culturais seriam utilizados por um certo número de lotes, calculou-se a frequência de utilização de cada plano cultural pela equação:

$$f_i = \frac{\text{número de lotes utilizando o plano } i}{\text{número total de lotes}} \quad (\text{IV.5})$$

onde f_i representa a frequência de utilização do plano cultural i .

- a seguir calculou-se a frequência acumulada dos planos culturais conforme a tabela (IV.10).

- sorteando-se um número aleatório entre zero e um determinou-se o plano cultural cuja frequência acumulada continha este valor sorteado, conforme o exemplo da figura (IV.4).

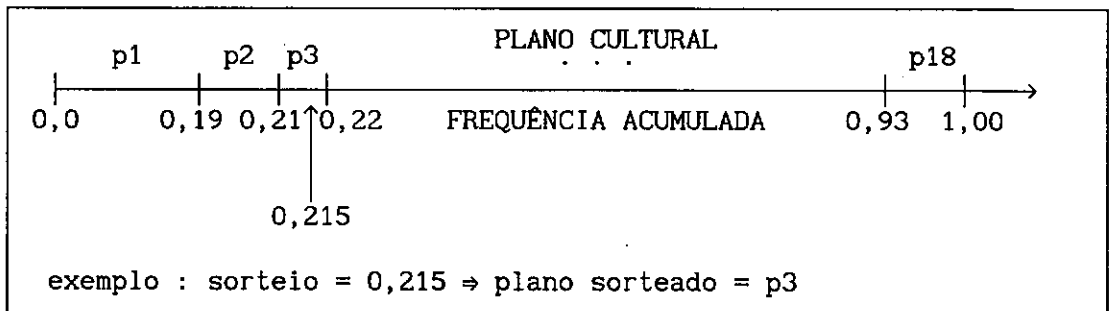


FIGURA (IV.4) - EXEMPLO DE SORTEIO DO PLANO CULTURAL.

NÚMERO DO PLANO	NÚMERO DE LOTES	FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA ACUMULADA
01	100	0,19493	0,19493
02	9	0,01754	0,21248
03	6	0,01170	0,22417
04	4	0,00780	0,23197
05	15	0,02924	0,26121
06	129	0,25146	0,51267
07	63	0,12281	0,63548
08	32	0,06238	0,69786
09	33	0,06433	0,76218
10	13	0,02534	0,78752
11	11	0,02144	0,80897
12	28	0,05458	0,86355
13	3	0,00585	0,86940
14	4	0,00780	0,87719
15	8	0,01559	0,89279
16	3	0,00585	0,89864
17	16	0,03119	0,92982
18	36	0,07018	1,00000
TOTAL	513	---	---

TABELA (IV.10) - FREQUÊNCIAS DE UTILIZAÇÃO DOS PLANOS CULTURAIS
PREVISTOS NO PROJETO DE MORADA NOVA.

A partir das séries sintéticas geradas de evapotranspiração real e precipitação constrói-se uma série sintética com cem anos de precipitação efetiva mensal utilizando-se a tabela (III.3) do Soil Conservation Service, apresentada no capítulo (III) deste trabalho.

Para a região do São Francisco esta etapa resultou na geração de quarenta séries sintéticas com cem anos de precipitação efetiva mensal.

Utilizando-se as séries geradas de evapotranspiração real e precipitação efetiva calcula-se a vazão mensal necessária para irrigação por unidade de área implantada em cada área homogênea de precipitação efetiva, através da equação (IV.6).

$$QUNI_{\tau,t} = \frac{(ETR_{\tau,t} - PEF_{\tau,t}) \cdot 10}{24 \cdot DM_{\tau} \cdot 3600} \quad (IV.6)$$

onde:

- $QUNI_{\tau,t}$ - vazão unitária do mês τ do ano t em $m^3/s/hectare$.
 $ETR_{\tau,t}$ - evapotranspiração real do mês τ do ano t em milímetros.
 $PEF_{\tau,t}$ - precipitação efetiva do mês τ do ano t em milímetros.
 DM_{τ} - número de dias do mês τ .

Na aplicação deste trabalho à bacia do rio São Francisco foram geradas quarenta séries sintéticas com cem anos de vazões unitárias mensais necessárias à irrigação.

4.2 - DEMANDAS DE ÁGUA POR USINA HIDRELÉTRICA

4.2.1 - Área Irrigável Disponível

A área irrigável disponível atual e a prevista para o horizonte de estudo devem ser conhecidas nas regiões homogêneas de precipitação efetiva. Os perímetros dentro de cada uma destas regiões podem ser reunidos em um único perímetro representativo, tendo uma área total equivalente ao somatório das áreas de todos os perímetros. Quando existirem projetos dentro de uma determinada região, captando água a montante e jusante de uma usina hidrelétrica, estes devem ser reunidos em dois grupos distintos e não em apenas um.

Neste trabalho foi utilizado o inventário das áreas de irrigação implantadas e previstas para o período (1991/2001), realizado pelo PLANVASF e utilizado pela CHESF (1991a) em suas estimativas de retirada d'água do rio São Francisco para uso em irrigação. No estudo feito pelo PLANVASF as áreas em operação até 1990, e as previstas para entrarem em operação no período 1991 a 2001 foram reunidas em vinte e nove grupos, de acordo com suas localizações em relação às regiões de igual

GRUPO DE PERÍMETROS	A				N				O			
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
1	14600	15000	16000	17300	19000	20800	22600	22600	22600	22600	22600	22600
2	4800	4800	5100	5500	6000	6700	7400	7400	7400	7400	7400	7400
3	16900	18000	19200	20700	22400	24100	31100	37100	43100	49100	55100	61100
4	4300	6600	7200	8100	9300	10500	12100	12100	12100	12100	12100	12100
5	4200	6600	7200	8100	9300	10600	12100	12100	12100	12100	12100	12100
6	800	1500	1600	1800	2000	2500	2600	3600	4600	5600	6600	7600
7	7300	12000	16800	23100	29500	36100	42800	49400	52800	56200	59600	63000
8	7700	9100	10500	11900	13300	15700	18800	19400	20000	20600	21200	21800
9	2300	2900	3900	4800	6100	7600	9100	9700	10300	10900	11500	12100
10	11100	13300	16700	20300	22600	24900	25900	27600	29300	31000	32700	34500
11	1400	3500	5600	7700	9800	11900	14500	15500	16500	17500	18500	19700
12	4500	11500	16500	19500	19500	19500	19500	19500	19500	19500	19500	19500
13	11600	18000	24200	26500	28900	31400	34000	37900	41800	45700	49600	53500
14	2000	2600	3900	6200	9300	12300	15500	17500	19500	21500	23500	25500
15	1600	1700	1900	2300	2800	3400	3600	3600	3600	3600	3600	3600
16	1800	3200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200
17	2000	2000	2200	6200	10200	16200	23200	30200	38200	46200	52200	52400
18	1200	1700	2800	4400	6500	9100	11700	12700	13700	14700	15700	16700
19	14000	15000	17400	20000	23000	26000	30000	34000	38000	42000	46000	50000
20	3500	3500	4500	6000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
21	3700	8500	8600	8700	8800	8900	9100	9100	9100	9100	9100	9100
22	7200	15800	15800	15800	15900	16200	16500	16500	16500	16500	17500	18700
23	900	1100	1600	2300	3200	4400	5600	5600	5600	5600	5600	5600
24	7300	7300	7300	7300	7300	7300	7300	8800	10800	12800	12800	12900
25	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2500	3000	3500	4000	4500
26	0	300	900	1900	3300	5000	7000	7000	7000	7000	7000	7000
27	4700	4700	4700	5500	6500	7500	8500	8500	8500	8500	8500	8500
28	0	0	0	0	0	0	0	600	1200	1800	1800	1800
29	0	0	0	0	0	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
TOTAL	143400	192200	229300	269100	309700	355200	407100	445100	481400	517700	550400	577900

TABELA (IV.11) - ÁREAS IRRIGÁVEIS ANUAIS ATUAL E PREVISTAS PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO EM HECTARES.

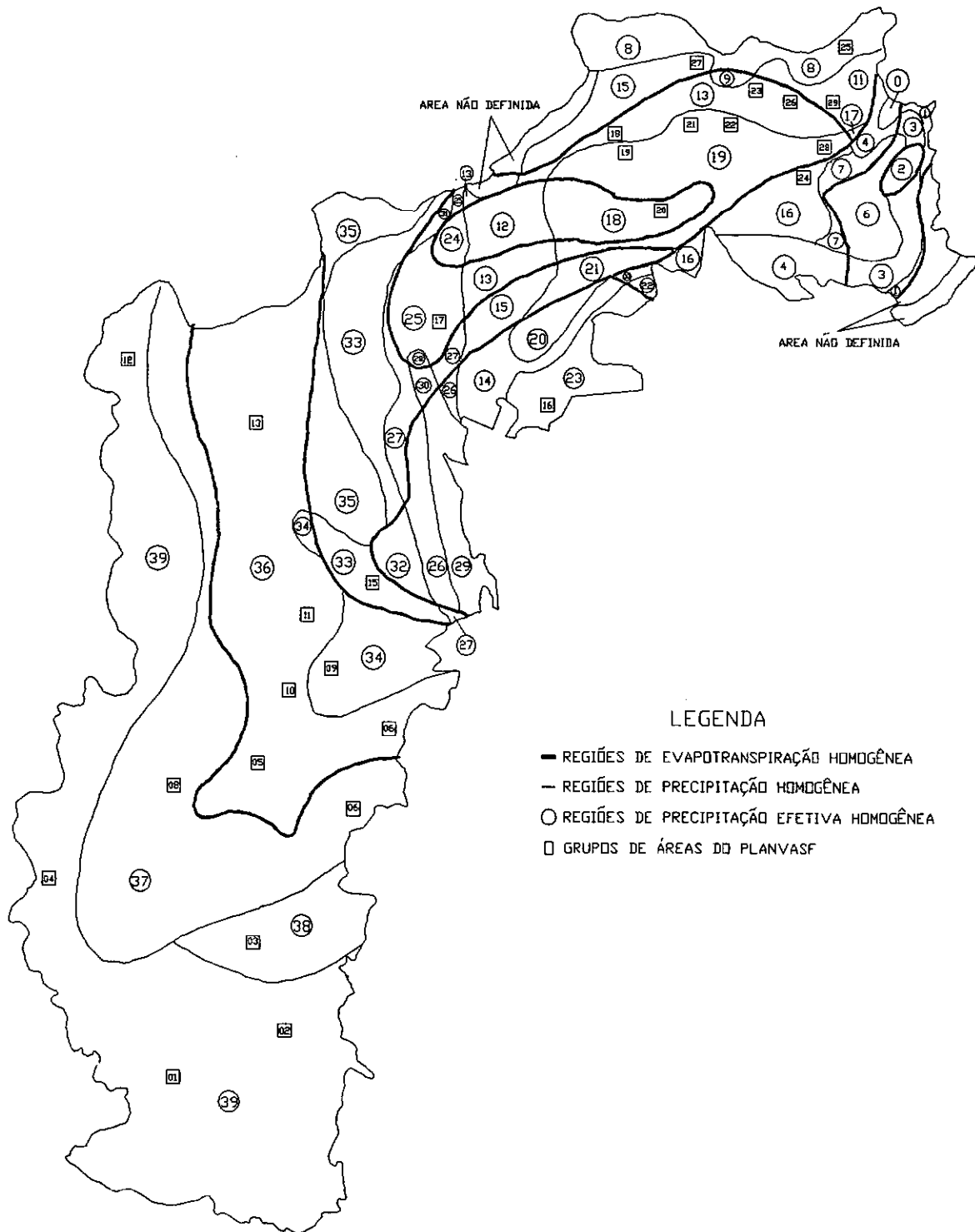


FIGURA (IV.5) - LOCALIZAÇÃO DOS GRUPOS DE ÁREAS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO

precipitação efetiva, às usinas hidrelétricas e aos pontos de derivação. A tabela (IV.11) apresenta estes grupos de perímetros com suas respectivas áreas; suas localizações são apresentadas na figura (IV.5).

Devido a inexistência na CODEVASF-PETROLINA, de levantamentos sobre os incrementos anuais das áreas de perímetros de irrigação implantados na bacia do rio São Francisco, adotou-se neste trabalho as previsões formuladas pelo PLANVASF para o horizonte (1991/2001).

Os valores adotados dos incrementos anuais de área irrigada, foram calculados pela equação (IV.7) e são apresentados no histograma da figura (IV.6). Os incrementos anuais, para efeito de geração de séries sintéticas, foram divididos em dois grupos: iguais e maiores que zero.

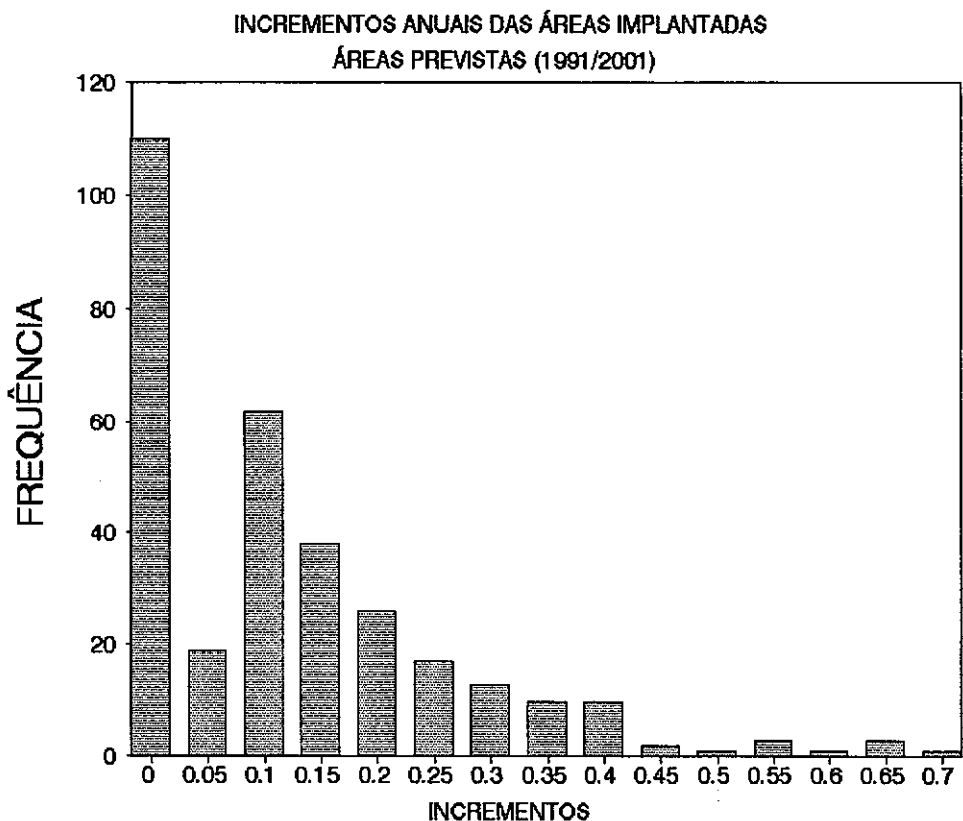


FIGURA (IV.6) - REPARTIÇÃO FREQUENCIAL DOS INCREMENTOS DAS ÁREAS IRRIGADAS.

$$INC_{t+1} = \frac{ARE_{t+1} - ARE_t}{ARE_{t+1}} \quad (IV.7)$$

Através do teste qui-quadrado, com um nível de significância de 5%, observou-se que a distribuição exponencial revelou ajustes satisfatórios para os dados dos incrementos anuais das áreas irrigáveis.

As séries sintéticas com cem conjuntos de áreas previstas para o período (1991/2001) foram geradas para cada um dos vinte e nove grupos de perímetros levantados pelo PLANVASF e apresentados na tabela (IV.11). O critério de geração foi o seguinte:

- sorteava-se um número "y" de uma distribuição uniforme U(0,1). Se este número sorteado fosse maior que $(1 - f_{\text{igual}})$, onde f_{igual} representa a frequência dos incrementos anuais iguais a zero, o incremento gerado era zero, caso contrário seria maior que zero.
- para o segundo caso, gera-se o incremento através da equação (IV.8).

$$ICG_{t+1} = - \frac{\ln \left(1 - \frac{y}{(1-f_{\text{igual}})} \right)}{\lambda} \quad (IV.8)$$

onde:

ICG_{t+1} - incremento gerado da área prevista para o ano t+1.

y - sorteio da distribuição uniforme U(0,1).

f_{igual} - frequência dos incrementos anuais das áreas irrigáveis iguais a zero.

λ - parâmetro da distribuição exponencial.

O parâmetro λ da distribuição exponencial foi estimado através da equação (IV.9). O termo \overline{INC} representa a média dos valores positivos dos incrementos anuais das áreas irrigáveis.

$$\lambda = \frac{1}{\overline{INC}} \quad (IV.9)$$

- gera-se a área prevista pela equação (IV.10).

$$ARE_{t+1} = \frac{ARE_t}{1 - ICG_{t+1}} \quad (IV.10)$$

onde ARE_{t+1} representa a área prevista gerada para o ano $t+1$.

- nos grupos 26, 28 e 29 as áreas foram geradas, nos casos em que os incrementos anuais sorteados foram diferentes de zero e as áreas geradas no ano anterior eram nulas, como uma percentagem da área prevista para o ano 2001.

- em seguida, limita-se o valor gerado da área prevista ao valor da área do ano 2001, previsto pelo PLANVASF. Este procedimento foi utilizado por não se conhecer o valor máximo real de cada um dos grupos levantados.

4.2.2 - Área Efetivamente Ocupada

A área efetivamente ocupada atual e prevista para o horizonte de planejamento é calculada pelo produto da área irrigável disponível e o coeficiente de ocupação da área cultivada (COÁC) em cada área homogênea de precipitação efetiva, como foi visto em (3.2.3). Deve-se ter, portanto, os valores dos COAC dos perímetros de irrigação em funcionamento na região, onde se pretende realizar o estudo.

Foi admitido neste trabalho os coeficientes históricos de ocupação da área cultivada, obtidos no levantamento realizado pela CODEVASF em seus perímetros de irrigação, implantados na bacia do rio São Francisco no período de 1985 a 1990, conforme CHESF (1991a). Os coeficientes são apresentados na tabela (IV.12) e figura (IV.7).

PROJETO	A N O					
	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Nilo Coelho	54	14	19	26	29	36
São Desidério/Barreiras	35	16	21	18	14	15
Piloto Formoso	50	5	18	19	17	54
Ceraíma	53	33	27	14	11	26
Estreito	41	5	6	6	4	21
Jaíba	--	--	--	--	--	37
Gorutuba	51	29	32	31	30	34
Pirapora	68	37	33	18	19	20
Mandacarú	62	44	45	44	--	--
Propriá	75	51	45	40	32	57
Gotinguiba	--	24	22	25	--	20
Bebedouro	76	25	26	19	16	17
Tourão	57	61	61	59	41	69
Maniçoba	40	30	34	14	16	24
Curaçá	41	25	28	30	31	30
Betume	--	52	31	40	24	18
MÉDIA ANUAL	54,08	30,07	29,87	26,87	21,85	31,87
MÉDIA GERAL	32,43%					

TABELA (IV.12) - COEFICIENTES DE OCUPAÇÃO DOS PERÍMETROS DA CODEVASF.

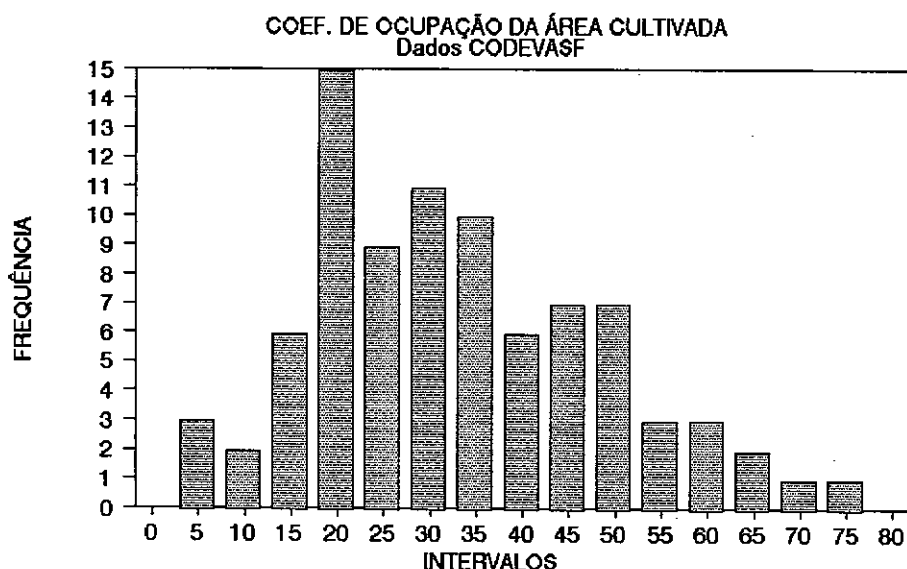


FIGURA (IV.7) - REPARTIÇÃO FREQUENCIAL DOS COEFICIENTES DE OCUPAÇÃO DA ÁREA CULTIVADA DOS PERÍMETROS DA CODEVASF.

Verificou-se a hipótese de normalidade, admitindo uma distribuição normal para os COAC, através do teste qui-quadrado com um nível de significância de cinco por cento. A estatística do teste ficou fora da região crítica, implicando na não rejeição da hipótese básica.

Para cada um dos vinte e nove grupos de perímetros da tabela (IV.11) foi gerada uma série sintética com cem valores dos COAC para cada ano do horizonte estudado, através do modelo AR(0) descrito pela equação (IV.11), conforme Kelman (1987).

$$COAC_t = \hat{\mu} + \hat{\sigma} \cdot Z_t \quad (IV.11)$$

onde:

- $COAC_t$ - coeficiente de ocupação da área cultivada do ano t .
- $\hat{\mu}$ - estimativa da média dos COAC.
- $\hat{\sigma}$ - estimativa do desvio padrão dos COAC.
- Z_t - componente independente padrão.

4.2.3 - Eficiências e Coeficientes de Retorno e de Uso da Água

O coeficiente de uso da água é determinado através da equação (IV.12) em função do coeficiente de retorno Cr_1 da água ao rio pelo sistema de drenagem.

$$CUA_1 = 1 - Cr_1 \quad (IV.12)$$

Conforme mencionado no capítulo (III), o coeficiente de retorno Cr_1 é de difícil quantificação. Neste trabalho adotou-se o valor sugerido por PLANVASF (1988), $Cr_1 = 0,35$.

Como não dispunhamos do tipo do sistema de irrigação dos conjuntos das áreas irrigáveis, levantados pelo PLANVASF e indicados na tabela (IV.11) e figura (IV.5), resolveu-se adotar para a eficiência total E_t o valor 0,40, sugerido pelo PLANVASF (1988).

4.2.4 - Vazão Derivada a Montante de cada Usina

Conhecendo-se a área irrigável prevista para o horizonte de planejamento, o coeficiente de ocupação da área cultivada correspondente, e a vazão unitária de cada região homogênea de precipitação efetiva, pode-se, através da equação (IV.13), calcular para cada região a vazão total mensal a ser derivada do rio para irrigação em cada ano do período estudado.

$$QTOT_{\tau,t,i} = \frac{QUNI_{\tau,t,i} \cdot ARE_{t,i} \cdot COAC_{t,i} \cdot CUA_i}{E_{t,i}} \quad (IV.13)$$

onde para cada região homogênea i de precipitação efetiva:

- $QTOT_{\tau,t,i}$ - vazão total no mês τ do ano t .
- $QUNI_{\tau,t,i}$ - vazão unitária no mês τ do ano t .
- $ARE_{t,i}$ - área disponível prevista para o ano t .
- $COAC_{t,i}$ - coeficiente de ocupação da área cultivada no ano t .
- CUA_i - coeficiente de uso da água.
- $E_{t,i}$ - eficiência total do grupo de perímetros.

A vazão total derivada a montante de cada usina hidrelétrica é calculada pelo somatório das vazões totais derivadas para irrigação das regiões homogêneas de precipitação efetiva, situadas a montante da usina em questão e a jusante da usina imediatamente anterior, através da equação:

$$QUSI_{\tau,t} = \sum_{i=1}^{NR} QTOT_{\tau,t,i} \quad (IV.14)$$

onde NR representa o número de regiões homogêneas existentes entre cada duas usinas consecutivas na cascata.

Foram geradas para cada região homogênea de precipitação efetiva onze séries sintéticas com cem anos de vazão total mensal de água para irrigação, correspondentes aos anos do horizonte estudado (1991/2001).

A seguir foram somadas as vazões das regiões situadas entre cada duas usinas consecutivas, resultando desta etapa, para cada usina, onze séries sintéticas com cem anos de vazão total mensal derivada para irrigação, correspondentes a cada ano do horizonte de estudo.

Apresenta-se na figura (IV.8) o fluxograma das etapas, anteriormente descritas, para geração das séries sintéticas de vazões derivadas para uso em irrigação.

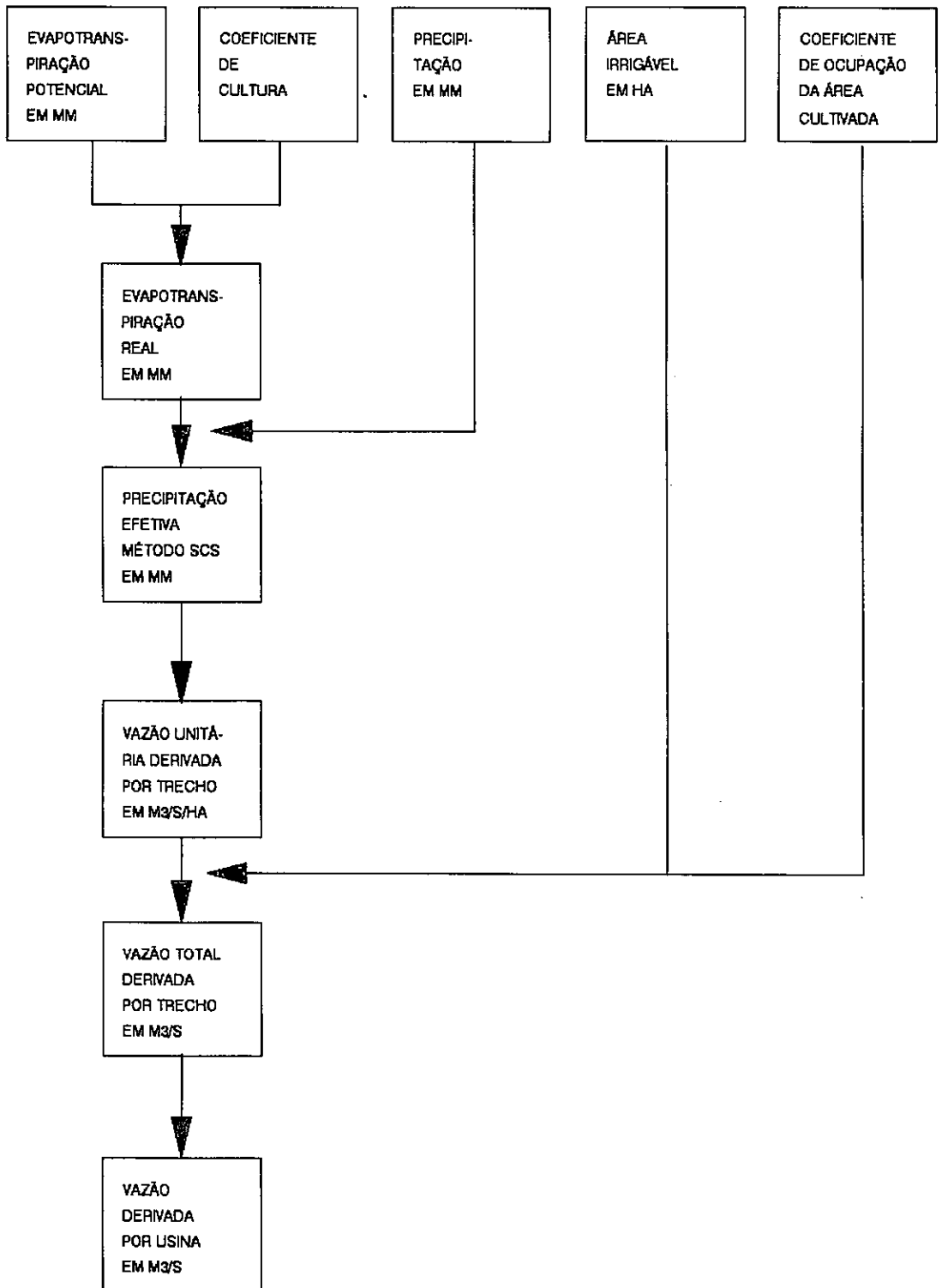


FIGURA (IV.8) - FLUXOGRAMA PARA GERAÇÃO DA DEMANDA
PARA IRRIGAÇÃO

V - METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA ENERGIA FIRME

Energia firme de um sistema hidrelétrico interligado é definido como sendo o maior valor possível de energia a ser produzida continuamente pelo sistema, equivalente à demanda média anual (\overline{MW}), com as mesmas características do mercado, sem ocorrência de déficits, no caso de repetição das vazões registradas no histórico e no caso de que a configuração do sistema permanece imutável ao longo do tempo (caso estático).

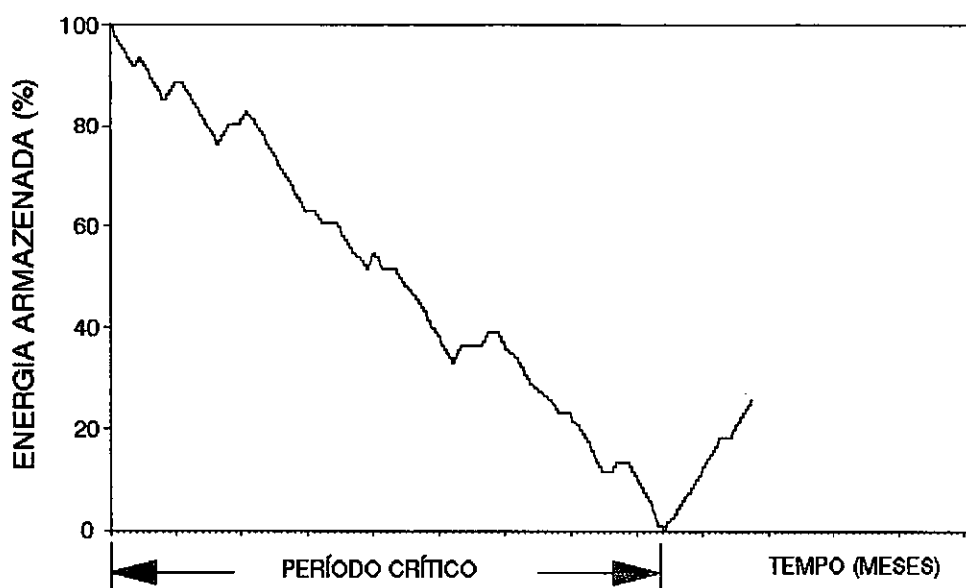


FIGURA (V.1) - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CÁLCULO DA ENERGIA FIRME

Neste trabalho a energia firme foi determinada através do modelo SIMULADIN descrito no apêndice (A) e de um processo iterativo de convergência. Para o cálculo da energia firme foram admitidas duas hipóteses, a primeira considerando que toda água disponível seria utilizada exclusivamente para geração de energia elétrica, e a segunda admitindo que parte da água seria captada para uso em irrigação.

A cada iteração são adotados novos valores para o mercado de cada subsistema do sistema integrado, até que se consiga o mercado correspondente à energia firme do conjunto.

Em cada ano do horizonte simulado (1991/2001) foi calculada a energia firme dos subsistemas Norte e Nordeste do sistema integrado para cada um dos cem anos da série sintética gerada de vazões mensais derivadas para irrigação.

O período histórico crítico de vazões afluentes utilizado foi o correspondente aos anos de 1952 a 1955, período crítico mais seco para as regiões Noerte/Nordeste do Brasil.

O cálculo da energia firme, correspondente à simulação com ou sem irrigação, pode ser feito através dos passos descritos a seguir.

Inicialmente deve-se adotar para cada subsistema um valor elevado de mercado para que haja déficit no final da simulação. O modelo SIMULADIN, utilizando estes mercados iniciais, executa uma simulação estática no período histórico seco, situação mais desfavorável para geração de energia.

Após a primeira simulação, deve-se, em função dos déficits de energia calculados pelo SIMULADIN, arbitrar novos valores, inferiores aos iniciais, para os mercados de cada subsistema. A seguir o modelo SIMULADIN é novamente executado e após ser feita nova simulação duas situações podem ocorrer: a primeira possibilidade é a continuação de déficit no sistema e a segunda é não mais haver déficit e sim excesso de energia armazenada no final do período simulado. Caso ocorra o primeiro caso deve-se continuar reduzindo os mercados até que não haja mais déficits. Após ocorrer a segunda situação, deve-se arbitrar novos valores para os mercados, agora dentro de uma faixa conhecida. Este procedimento é repetido até que se atinjam, dentro de certas limitações, os valores procurados das energias firmes.

O fluxograma do cálculo da energia firme é apresentado na figura (V.2).

A descrição do modelo SIMULADIN e as alterações processadas no Modelo são apresentadas no apêndice (A) desse trabalho.

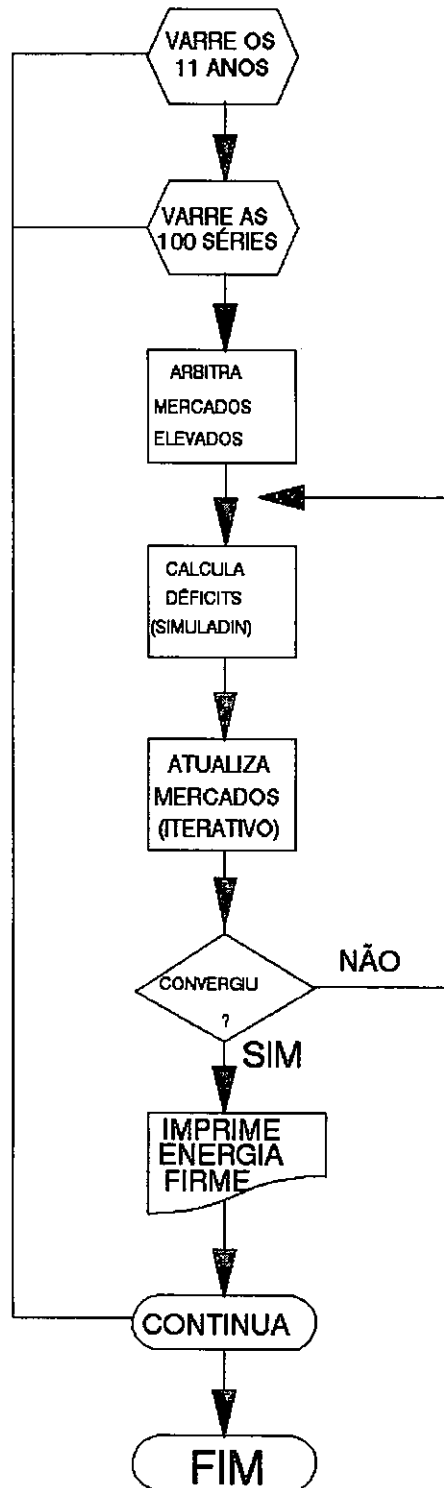


FIGURA (V.2) - FLUXOGRAMA PARA CÁLCULO DA ENERGIA FIRME.

VI- APLICAÇÃO DO ESTUDO AO SISTEMA HIDRELÉTRICO INTERLIGADO DO NORTE-NORDESTE

6.1- DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA NORTE-NORDESTE

O sistema hidrelétrico interligado do Norte-Nordeste (N/NE) é administrado pelas empresas ELETRONORTE e CHESF. A ELETRONORTE, responsável pela administração da produção, transmissão e comercialização da energia da região norte do Brasil contribui no cenário inicial de simulação (ano de 1991) com a usina hidrelétrica de Tucuruí, construída no rio Tocantins e com uma potência total instalada de 3.960 MW, correspondendo a 12 unidades geradoras de 330 MW cada. A CHESF, responsável pela região nordeste, administra a operação de 4 usinas hidrelétricas com uma potência total instalada de 7068 MW. Três usinas estão situadas no rio São Francisco e a quarta no rio Parnaíba. A usina PAULO AFONSO representa na realidade um complexo de 5 usinas (PA I, PA II, PA III, PA IV e APOLÔNIO SALES) que são, para efeito de simulação na cascata, admitidas como uma única, operando a fio d'água e situada a jusante da usina de ITAPARICA (atual LUÍZ GONZAGA). Pertence ainda ao cenário inicial a usina de TRÊS MARIAS, primeira usina da cascata do rio São Francisco que é operada pela CEMIG. Esta usina, mesmo não fornecendo energia ao Norte e ao Nordeste, entra na simulação como reservatório de acumulação, tendo grande importância nas operações de enchimento e esvaziamento das usinas da cascata quando do atendimento ao mercado de energia.

As características atuais e as previstas para o período 1991/2001 do sistema N/NE foram obtidas através das informações constantes no "BOLETIM DE DADOS E CRITÉRIOS BÁSICOS" (BODEC) da CHESF (1990). Esse trabalho foi elaborado pela CHESF com o objetivo de se dispor de um banco de dados único, retratando com a fidedignidade possível os dados e parâmetros referentes aos sistemas de geração existentes e em expansão. A maioria das tabelas e figuras aqui mencionadas foram extraídas do BODEC e são apresentadas no apêndice (B). As demais, elaboradas no âmbito deste estudo, foram inseridas no mesmo apêndice por serem necessárias à construção dos cenários das usinas, quando da aplicação do modelo SIMULADIN, descrito no apêndice (A).

A tabela (B.1) apresenta as características físico-operativas necessárias às usinas hidrelétricas existentes nas bacias do N/NE, no horizonte de aplicação deste trabalho (período 1991-2001). As usinas de Três Marias e Serra da Mesa não contribuem com geração de energia para o N/NE, figurando nas simulações apenas como reservatórios de acumulação.

As tabelas (B.2) e (B.3) mostram o parque gerador para o cenário de 1991, e o programa de geração previsto para o período 1991/2001, respectivamente.

A cota do nível d'água dos reservatórios é calculada, quando da simulação da operação das usinas através do SIMULADIN, pelo polinômio de 4ª ordem apresentado abaixo:

$$Z_1 = K0 + K1.V_1 + K2.V_1^2 + K3.V_1^3 + K4.V_1^4 \quad (\text{VI.1})$$

onde:

Z_1 - cota do nível d'água do reservatório em metros.

V_1 - volume do reservatório em Hm^3 para a cota Z_1 .

$K0, K1, K2, K3$ e $K4$ - coeficientes do polinômio.

De forma similar, a área da bacia hidráulica dos reservatórios é calculada pelo polinômio apresentado a seguir:

$$A_1 = K0 + K1.Z_1 + K2.Z_1^2 + K3.Z_1^3 + K4.Z_1^4 \quad (\text{VI.2})$$

onde:

A_1 - área da bacia hidráulica do reservatório em Km^2 .

Os coeficientes dos polinômios VOLUME x COTA e COTA x ÁREA de cada usina são apresentados através das tabelas (B.4) e (B.5), respectivamente. Observe-se nestas tabelas que as usinas a fio d'água, Xingó por exemplo, apresentam somente o coeficiente independente $K0$ diferente de zero.

Através do uso das tabelas e fórmulas anteriormente mencionadas foi possível elaborar a tabela (B.6) onde constam, para cada usina, os valores do volume útil médio, da cota correspondente a este volume e a área da bacia hidráulica relativa a esta cota. Os últimos dois parâmetros são necessários à formação dos arquivos de entrada de dados do SIMULADIN.

A tabela (B.7) apresenta os dados mensais de evaporação dos reservatórios para as regiões do N/NE que interessam à aplicação deste trabalho. A tabela completa contendo os dados para todas as regiões do Brasil pode ser encontrada no BODEC.

As usinas hidrelétricas e termelétricas estão sujeitas à indisponibilidade de geração por dois motivos básicos:

- indisponibilidade forçada, representando a perda não programada do gerador e/ou turbina (total ou parcial) em razão de fenômenos aleatórios. Esse evento é representado estatisticamente pela TEIF (taxa equivalente de indisponibilidade forçada);
- indisponibilidade programada, representando a saída de serviço das máquinas para manutenção preventiva. Esse evento pode ser previsto e sua estimativa é feita pelo índice IP (indisponibilidade programada).

A composição destes dois índices determina, através da expressão (VI.3), o fator de capacidade máxima (FC_{máx}) de cada usina.

$$FC_{máx} = (1 - TEIF) \cdot (1 - IP) \quad (VI.3)$$

Os índices TEIF e IP são estimados em função do tamanho das unidades geradoras e podem ser determinados através da tabela (B.8). O fator de capacidade máxima de cada usina do sistema N/NE foi calculado pela equação (VI.3) e os resultados são apresentados na tabela (B.9).

O sistema Norte-Nordeste é interligado eletricamente por linhas de transmissão, contando atualmente com uma extensão de aproximadamente 15.000 Km de linhas. As limitações de troca de energia para o período (1991-2001) são mostradas através da tabela (B.10).

A distribuição espacial dos aproveitamentos hidrelétricos existentes e previstos nas respectivas bacias do Norte-Nordeste é mostrada na figura (B.1). Essa figura permite a visualização da influência de cada usina na cascata. Pode-se observar que aí se representou também as usinas que, embora não estejam eletricamente ligadas à região de interesse, apresentam influência de montante para jusante, como por exemplo, perdas por enchimento de volume morto e operação de reservatórios.

As hidrelétricas de pequeno porte, que têm potências instaladas desprezíveis quando comparadas às demais, e as unidades térmicas, não foram incluídas na simulação; por isso, ambas não foram consideradas na formação dos cenários para o horizonte de estudo 1991/2001, para efeito de cálculo da energia firme.

6.2 - CÁLCULO DA ENERGIA FIRME

O cálculo da energia firme para o sistema hidrelétrico interligado do Norte/Nordeste foi feito para o período (1991/2001), através do modelo SIMULADIN, e procedimentos iterativos descritos no capítulo anterior. O cálculo foi realizado em duas etapas: uma considerando e outra não, a retirada d'água para uso em irrigação.

O arquivo de vazão sintética de irrigação foi gerado através das metodologias descritas no capítulo (IV).

Os resultados das simulações são apresentados nas tabelas e figuras a seguir. A tabela (VI.1) contém o resultado dos cálculos das energias firmes, sem admitir retirada d'água para irrigação, para o sistema integrado e para cada subsistema individualmente.

ANO	S I S T E M A		
	INTEGRADO	NORTE	NORDESTE
1991	5346	1782	3564
1992	5463	1821	3642
1993	5502	1834	3668
1994	6072	2024	4048
1995	7494	2498	4996
1996	8373	2791	5582
1997	8376	2792	5584
1998	8421	2807	5614
1999	8742	2914	5828
2000	8826	2942	5884
2001	8967	2989	5978

TABELA (VI.1) - ENERGIA FIRME EM \overline{MW} (MÉDIA ANUAL) SEM IRRIGAÇÃO.

A tabela (VI.2) e a figura (VI.1) apresentam os resultados das simulações, quando são admitidas retiradas d'água para irrigação. Os valores apresentados correspondem às médias anuais e aos desvios padrão das energias firmes determinadas na simulação, em número de cem.

ANO	S I S T E M A		
	INTEGRADO	NORTE	NORDESTE
1991	5299 (7,56)	1766 (2,52)	3533 (5,04)
1992	5412 (8,71)	1804 (2,90)	3610 (5,81)
1993	5447 (9,12)	1816 (3,04)	3631 (6,08)
1994	6012 (11,08)	2004 (3,69)	4008 (7,38)
1995	7429 (13,00)	2476 (4,33)	4953 (8,67)
1996	8267 (17,47)	2756 (5,82)	5512 (11,65)
1997	8264 (19,03)	2755 (6,34)	5509 (12,69)
1998	8302 (19,19)	2767 (6,40)	5534 (12,79)
1999	8619 (19,51)	2873 (6,50)	5746 (13,01)
2000	8682 (26,13)	2894 (8,71)	5786 (17,42)
2001	8801 (28,27)	2934 (9,42)	5867 (18,84)

TABELA (VI.2) - ENERGIA FIRME EM $\overline{\text{MW}}$ COM IRRIGAÇÃO: MÉDIA E (DESVIO PADRÃO).

A tabela (VI.3) e a figura (VI.2) contêm as médias anuais, os quantis 5% e 95% e os desvios padrão das diferenças de energia firme sem e com irrigação para o sistema hidrelétrico da CHESF, correspondente ao subsistema Nordeste do integrado. Estes valores correspondem às perdas médias de energia firme do sistema CHESF devido à irrigação.

ENERGIA FIRME COM E SEM IRRIGAÇÃO

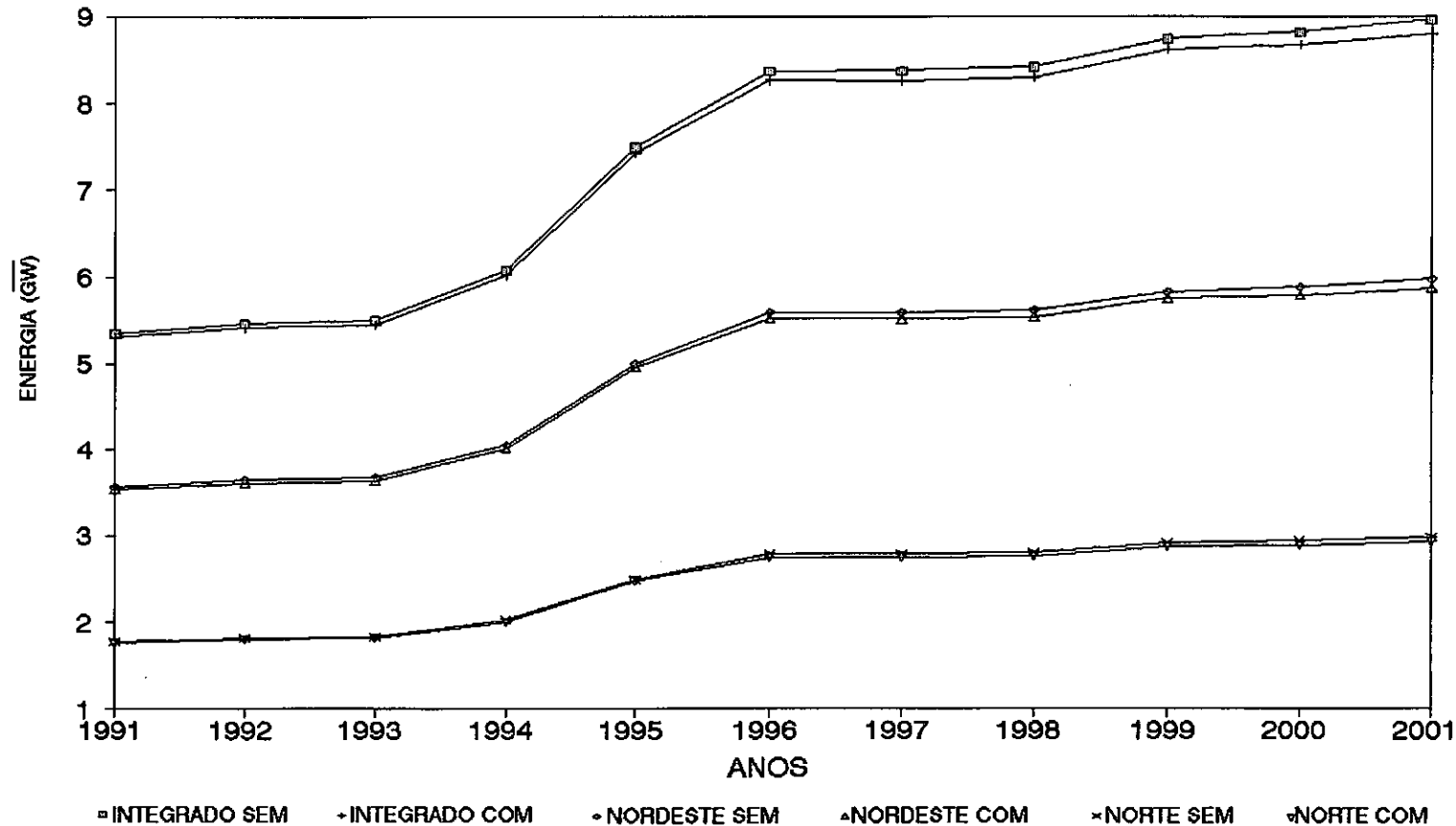


FIGURA (VI.1) - ENERGIA FIRME COM E SEM IRRIGAÇÃO.

ANO	E N E R G I A F I R M E E M (MW)				
	SEM IRRIGAÇÃO	COM IRRIGAÇÃO	D I F E R E N Ç A		
			MÉDIA	QUANTIL 5%	QUANTIL 95%
1991	3564	3533 (5,04)	31	22	40
1992	3642	3610 (5,81)	34	26	44
1993	3668	3631 (6,08)	37	28	48
1994	4048	4008 (7,38)	40	28	52
1995	4996	4953 (8,67)	43	30	58
1996	5582	5512 (11,65)	70	54	90
1997	5584	5509 (12,69)	75	56	94
1998	5614	5534 (12,79)	80	58	100
1999	5828	5746 (13,01)	82	60	104
2000	5884	5786 (17,42)	96	68	128
2001	5978	5867 (18,84)	111	82	142

TABELA (VI.3) - PERDA MÉDIA DE ENERGIA FIRME DA CHESF DEVIDO À IRRIGAÇÃO

Os resultados corrigidos das perdas médias de energia firme determinados pelo PLANVASF (1988) são apresentados na tabela (VI.4). Os valores das perdas de energia firme do PLANVASF (1988) foram calculados para áreas previstas diferentes das atualmente propostas por este Plano, as quais foram adotadas neste trabalho. Devido a essas diferenças, os valores originais tiveram que ser corrigidos para que fosse possível a comparação dos resultados aqui obtidos com aqueles do PLANVASF. Os resultados obtidos dessa correção, foram então multiplicados pela relação entre o valor médio dos coeficientes de ocupação da área cultivada adotado nesse trabalho (0,3243) e o utilizado pelo PLANVASF (0,75), e são apresentados na coluna PLANVASF CORRIGIDO da tabela (VI.4).

PERDA DE ENERGIA FIRME DA CHESF DEVIDO À IRRIGAÇÃO

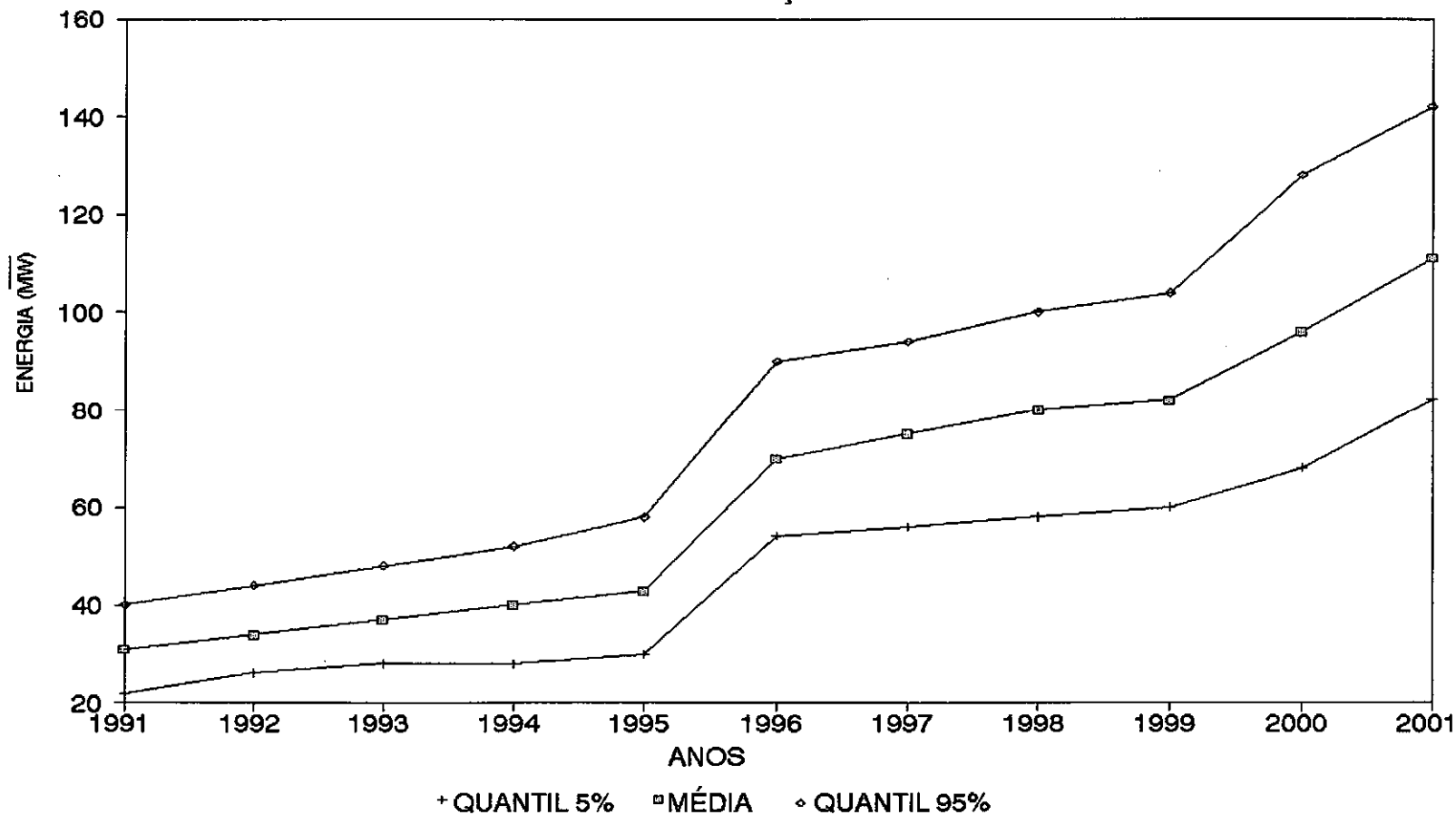


FIGURA (VI.2) - PERDA DE ENERGIA FIRME DA CHESF DEVIDO À IRRIGAÇÃO.

ANO	RESULTADOS DO PLANVASF			
	ÁREA ANTERIOR (HA)	PERDA DE ENERGIA FIRME ANTERIOR (\overline{MW})	MÉDIA DAS ÁREAS GERADAS (HA)	PLANVASF CORRIGIDO (\overline{MW})
1991	433725	192	169233	32
1992	471268	248	195784	45
1993	512061	304	222184	57
1994	556385	360	247942	69
1995	604544	416	273832	81
1996	646391	444	302885	90
1997	691134	472	328056	97
1998	738974	499	354450	103
1999	790126	604	379599	125
2000	844800	713	401562	147
2001	-----	---	420332	---

TABELA (VI.4) - PERDAS MÉDIAS DE ENERGIA FIRME CALCULADAS PELO PLANVASF.

A seguir são apresentadas na tabela (VI.5) e figura (VI.3) as relações percentuais entre as perdas médias de energia firme e as energias firmes médias sem irrigação do sistema CHESF, calculadas neste trabalho e pelo PLANVASF (1988) corrigido. Apresentam-se também os quantis 5% e 95% das perdas médias de energia firme calculadas por esse autor.

ANO	ENER- GIA FIRME MÉDIA (\overline{MW})	PERDA MÉDIA DE ENERGIA FIRME (\overline{MW})				RELAÇÃO PERDA / ENERGIA FIRME (%)			
		PRESENTE TRABALHO			PLANV. CORRIG.	PRESENTE TRABALHO			PLANV. CORRIG.
		QUAN- TIL 5%	MÉDIA	QUAN- TIL 95%		QUAN- TIL 5%	MÉDIA	QUAN- TIL 95%	
1991	3564	22	31	40	32	0,62	0,87	1,12	0,91
1992	3642	26	34	44	45	0,71	0,93	1,21	1,22
1993	3668	28	37	48	57	0,76	1,01	1,31	1,55
1994	4048	28	40	52	69	0,69	0,99	1,28	1,71
1995	4996	30	43	58	81	0,60	0,86	1,16	1,63
1996	5582	54	70	90	90	0,97	1,25	1,61	1,61
1997	5584	56	75	94	97	1,00	1,34	1,68	1,73
1998	5614	58	80	100	103	1,03	1,43	1,78	1,84
1999	5828	60	82	104	125	1,03	1,41	1,78	2,15
2000	5884	68	96	128	147	1,16	1,63	2,18	2,49
2001	5978	82	111	142	---	1,37	1,86	2,38	---

TABELA(VI.5)- RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE A PERDA E A ENERGIA FIRME DA CHESF SEM IRRIGAÇÃO .

A tabela (VI.6) apresenta os valores da capacidade instalada das usinas hidrelétricas da CHESF, segundo CHESF (1990, 1991b), e os da área de irrigação disponível, segundo CODEVASF (1977), para a situação inicial (1991) e final do período estudado (2001).

PERÍODO	CAPACIDADE INSTALADA (MW)	MÉDIA DAS ÁREAS IRRIGÁVEIS DIS- PONÍVEIS GERA- DAS EM HA.	PERCENTUAL DE UTILIZAÇÃO	
			CAPACIDADE INSTALADA (%)	ÁREA IRRIGADA (%)
1991	7068,00	169233	45,1	7,4
2001	10727,00	420332	68,5	18,3
MÁXIMO PREVISTO	15664,22	2300000	100,0	100,0

TABELA (VI.6) - CAPACIDADE INSTALADA DA CHESF E ÁREA IRRIGÁVEL DISPONÍVEL PARA A BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO.

RELAÇÃO PERDA / ENERGIA FIRME SISTEMA CHESF

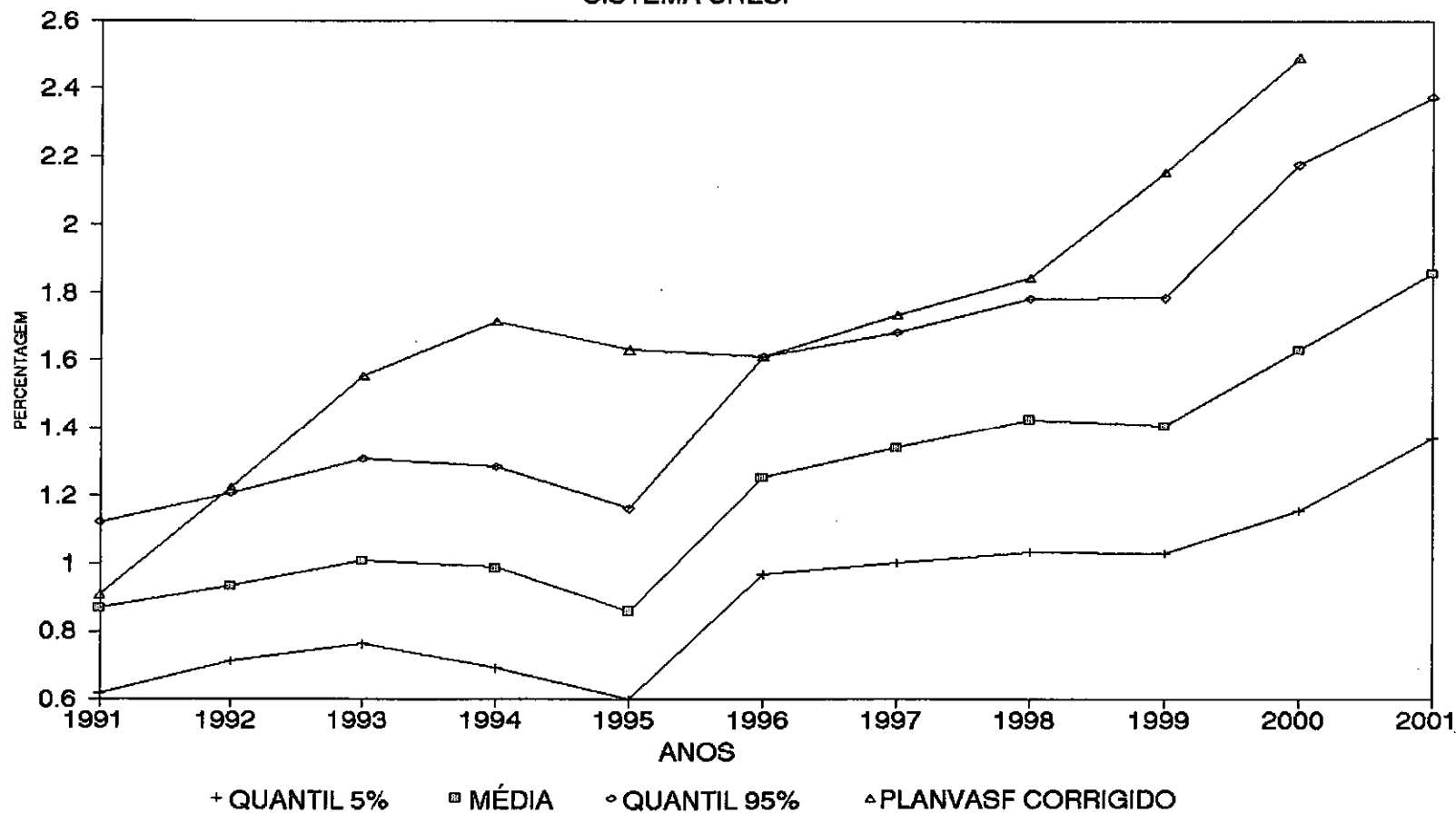


FIGURA (VI.3) - RELAÇÃO PERDA / ENERGIA FIRME DA CHESF.

A demanda de água para irrigação por unidade de área, determinada quando da geração das séries sintéticas de vazões unitárias, apresentou um valor médio de 0,268 l/s/ha. A vazão total para essa área unitária é, admitindo uma eficiência total do sistema de irrigação igual a 0,40 e um coeficiente de retorno de 0,35, equivalente a:

$$Q_{TOT} = \frac{Q_{UNI}}{E_t} \cdot CUA = \frac{0,268}{0,40} \cdot (1 - 0,35) = 0,436 \text{ l/s/ha}$$

Observando-se que a média das áreas geradas para irrigação em 2001 é de 420.332 ha pode-se estimar, em função da vazão total unitária mostrada anteriormente e do coeficiente de ocupação da área cultivada médio de 0,3243, a vazão média requerida para uso em irrigação no mesmo ano em 59,4 m³/s (420332 . 0,436 . 0,3243 / 1000), aproximadamente. Se considerarmos a totalidade dos 2.300.000 ha previstos pela CODEVASF (1977), e admitindo uma proporcionalidade, a vazão média derivada para irrigação poderá potencialmente chegar a 325,2 m³/s (2300000 . 0,436 . 0,3243 / 1000), aproximadamente.

6.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As relações em termos percentuais entre as médias das perdas e as médias das energias firmes sem irrigação apresentadas na tabela (VI.5) e figura (VI.3) mostram uma tendência de crescimento pouco significativa para o setor energético. Verifica-se que em três anos (1994, 1995 e 1999) o crescimento da energia firme da CHESF foi superior ao da média da perda de energia firme devido à irrigação.

Observando-se a figura (VI.3), nota-se que, em todo o período simulado, a perda de energia firme devido à irrigação, calculada pelo PLANVASF corrigido, foi superior ao do presente trabalho. Apenas no primeiro ano simulado (1991) o resultado corrigido, obtido pelo PLANVASF, ficou dentro da região compreendida entre as curvas representativas dos quantis de 5% e 95%, aqui determinadas.

VII - ESTUDO DE SENSIBILIDADE

7.1 - GERAÇÃO DAS SÉRIES SINTÉTICAS

Com o propósito de analisar a sensibilidade dos resultados para as diversas fontes de incertezas, no que diz respeito à quantidade de água derivada para irrigação, procedeu-se a um estudo de sensibilidade, em que cada variável aleatória influente no processo foi "isolada", mantendo-se as demais fixas e iguais aos correspondentes valores médios.

7.2 - CÁLCULO DA ENERGIA FIRME

Para o cálculo da energia firme foram utilizadas as mesmas metodologias descritas no capítulo (V).

Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas e figuras mostradas a seguir.

ANO	PERDA DE ENERGIA FIRME ($\bar{M}\bar{W}$)					
	PLANO CULTURAL	PLANO CULTURAL + EVAPO	PLANO CULTURAL + PRECI	PLANO CULTURAL + COAC	PLANO CULTURAL + ÁREA	TODOS OS PARÂMETROS (GERAL)
1991	32	32	34	33	28	31
1992	37	37	39	39	31	34
1993	41	41	43	43	34	37
1994	46	46	49	49	36	40
1995	54	54	57	57	40	43
1996	89	88	93	93	65	70
1997	95	95	100	100	69	75
1998	103	103	109	109	74	80
1999	110	110	115	116	77	82
2000	125	125	131	132	87	96
2001	144	144	150	152	102	111

TABELA (VII.1) - MÉDIA DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

MÉDIA DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME
SISTEMA CHESF

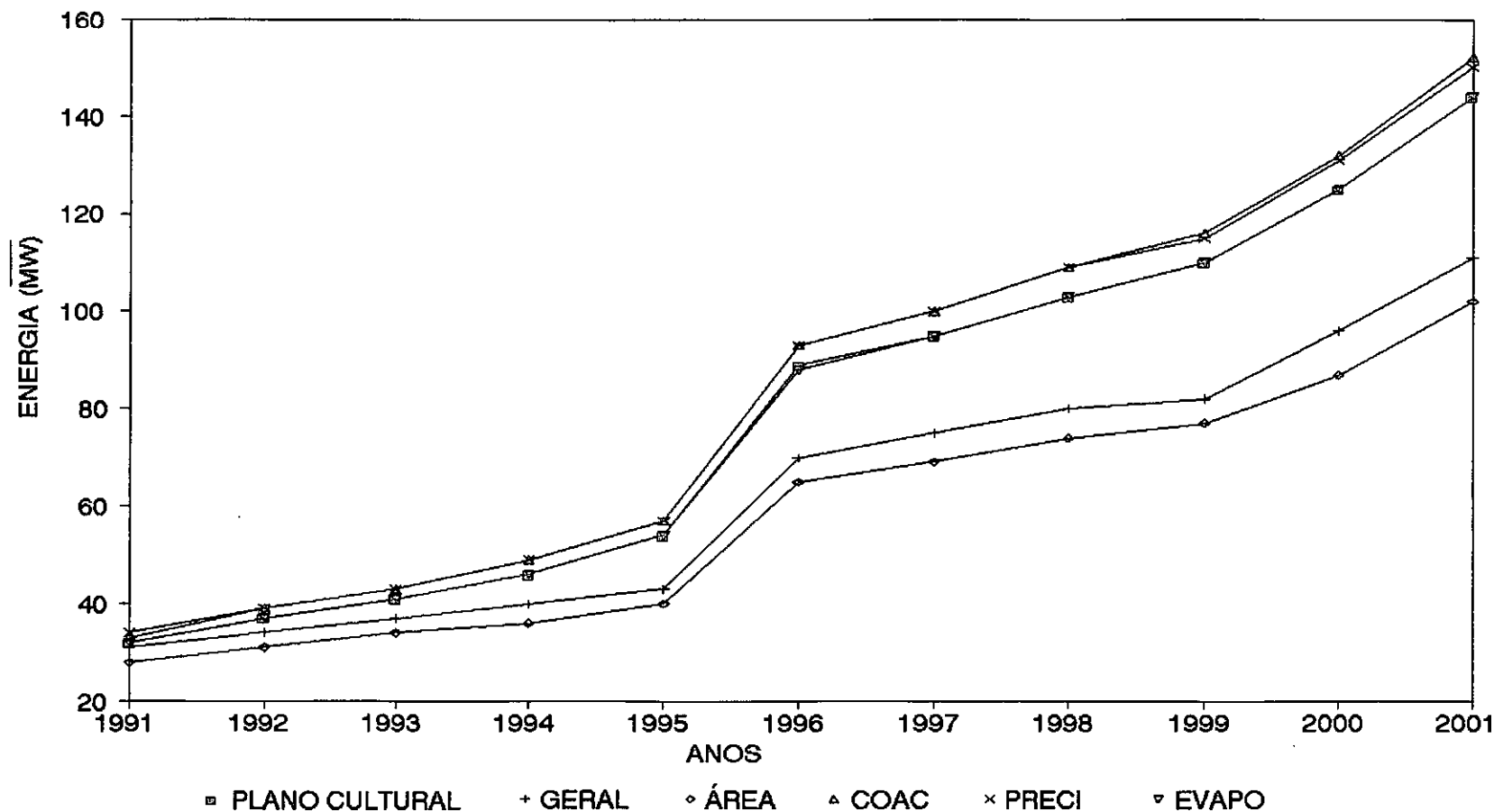


FIGURA (VII.1) - MÉDIA DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

ANO	PERDA DE ENERGIA FIRME (\overline{MW})					
	PLANO CULTURAL	PLANO CULTURAL + EVAPO	PLANO CULTURAL + PRECI	PLANO CULTURAL + COAC	PLANO CULTURAL + ÁREA	TODOS OS PARÂMETROS (GERAL)
1991	30	30	30	24	24	22
1992	34	34	36	30	26	26
1993	40	38	40	34	30	28
1994	44	44	44	40	30	28
1995	52	50	52	46	32	30
1996	84	84	86	74	54	54
1997	92	90	92	80	56	56
1998	98	98	100	88	60	58
1999	104	104	106	92	64	60
2000	120	118	120	104	74	68
2001	138	136	140	120	86	82

TABELA (VII.2) - QUANTIL 5% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

ANO	PERDA DE ENERGIA FIRME (\overline{MW})					
	PLANO CULTURAL	PLANO CULTURAL + EVAPO	PLANO CULTURAL + PRECI	PLANO CULTURAL + COAC	PLANO CULTURAL + ÁREA	TODOS OS PARÂMETROS (GERAL)
1991	34	34	36	42	30	40
1992	40	40	42	48	38	44
1993	44	44	46	54	40	48
1994	50	50	54	62	44	52
1995	58	58	62	72	48	58
1996	94	94	100	114	78	90
1997	102	102	108	122	82	94
1998	110	110	118	134	88	100
1999	120	120	124	144	90	104
2000	136	136	140	166	102	128
2001	158	156	162	188	120	142

TABELA (VII.3) - QUANTIL 95% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

QUANTIL 5% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME
SISTEMA CHESF

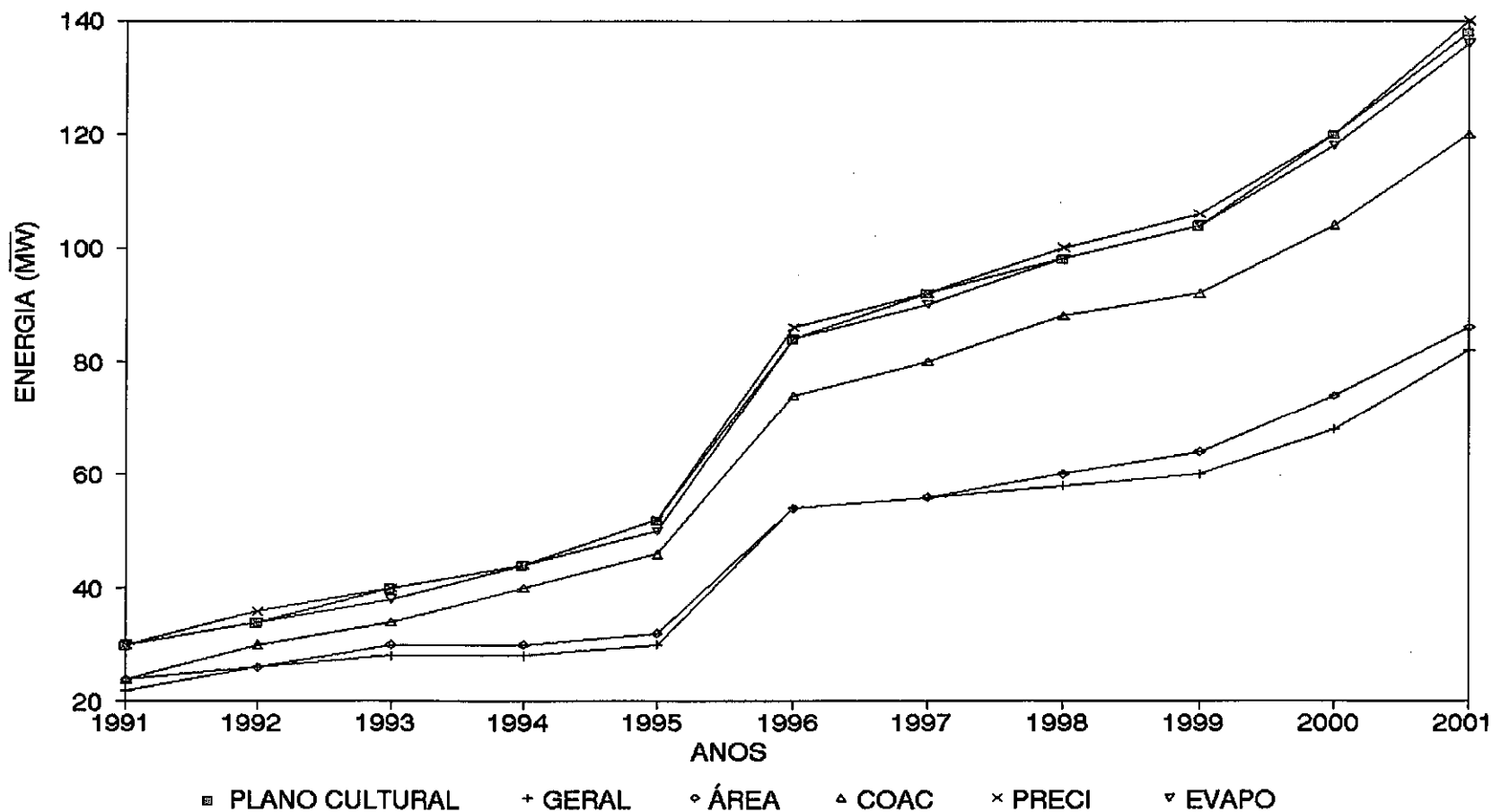


FIGURA (VII.2) - QUANTIL 5% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

QUANTIL 95% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME

SISTEMA CHESF

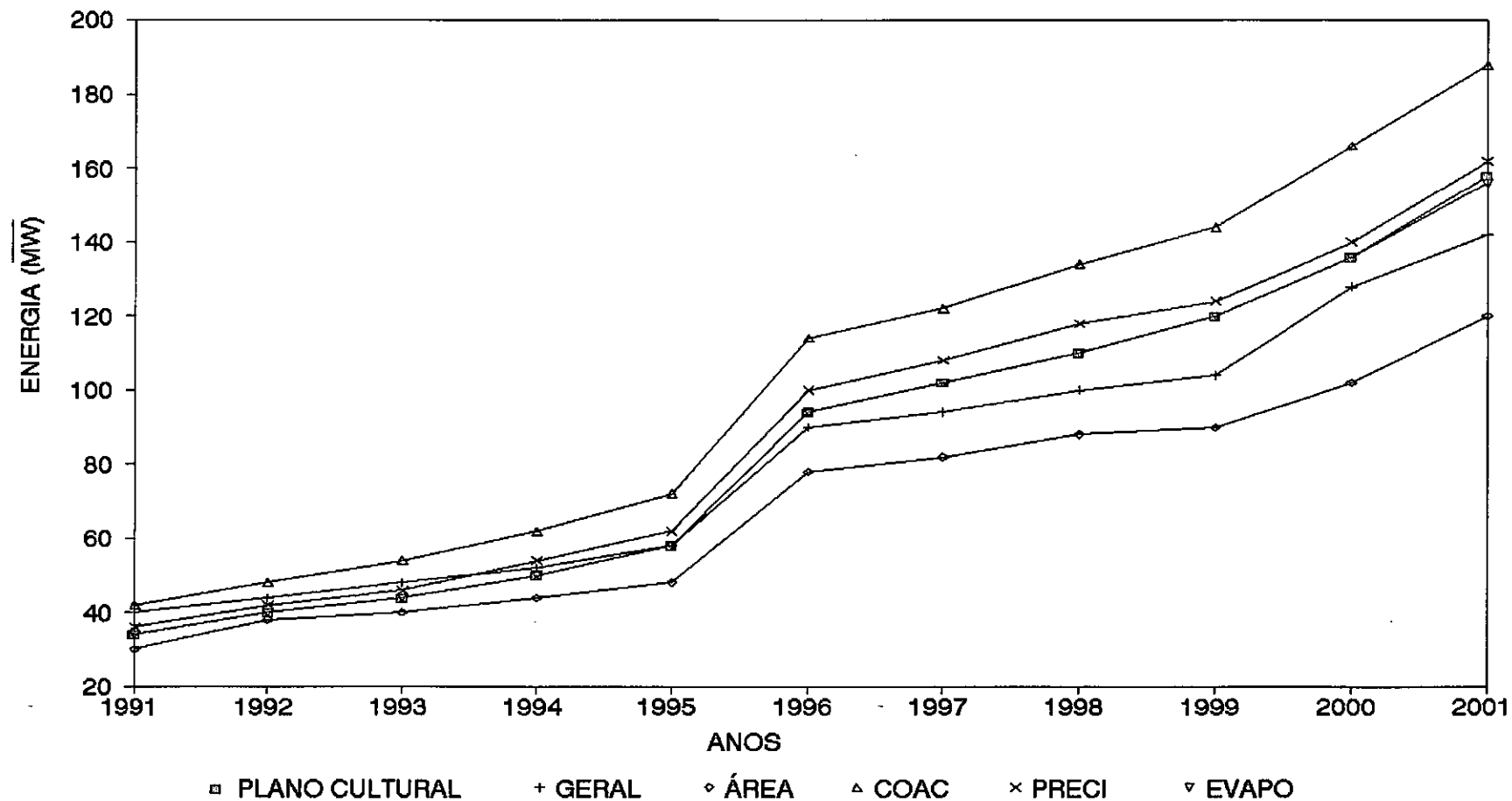


FIGURA (VII.3) - QUANTIL 95% DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

ANO	DESVIO PADRÃO DA PERDA DE ENERGIA FIRME (\overline{MW})					
	PLANO CULTURAL	PLANO CULTURAL + EVAPO	PLANO CULTURAL + PRECI	PLANO CULTURAL + COAC	PLANO CULTURAL + ÁREA	TODOS OS PARÂMETROS (GERAL)
1991	1,31	1,59	2,26	4,71	2,17	5,04
1992	1,44	1,72	2,24	4,94	3,18	5,89
1993	1,58	1,79	2,41	5,47	3,61	6,08
1994	1,80	2,15	3,32	6,50	3,95	7,38
1995	2,20	2,45	3,38	7,72	4,76	8,67
1996	2,97	3,58	5,12	11,46	7,09	11,65
1997	3,37	3,97	5,47	12,35	7,56	12,69
1998	3,63	4,27	6,71	13,79	8,51	12,79
1999	4,19	4,78	6,15	15,24	8,15	13,01
2000	4,83	5,54	7,31	18,14	8,73	17,42
2001	5,46	6,24	7,39	19,91	9,90	18,84

TABELA (VII.4) - DESVIO PADRÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

ANO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE ENERGIA FIRME					
	PLANO CULTURAL	PLANO CULTURAL + EVAPO	PLANO CULTURAL + PRECI	PLANO CULTURAL + COAC	PLANO CULTURAL + ÁREA	TODOS OS PARÂMETROS (GERAL)
1991	0,041	0,050	0,067	0,141	0,078	0,161
1992	0,039	0,047	0,058	0,128	0,102	0,171
1993	0,038	0,043	0,056	0,126	0,107	0,165
1994	0,039	0,046	0,067	0,133	0,110	0,185
1995	0,041	0,046	0,060	0,135	0,120	0,200
1996	0,034	0,040	0,055	0,123	0,108	0,165
1997	0,035	0,042	0,055	0,124	0,109	0,169
1998	0,035	0,041	0,062	0,127	0,115	0,161
1999	0,038	0,043	0,053	0,131	0,106	0,158
2000	0,039	0,044	0,056	0,137	0,100	0,181
2001	0,038	0,043	0,049	0,131	0,097	0,170
MÉDIA	0,038	0,044	0,058	0,131	0,105	0,171

TABELA (VII.5) - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

DESVIO PADRÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME SISTEMA CHESF

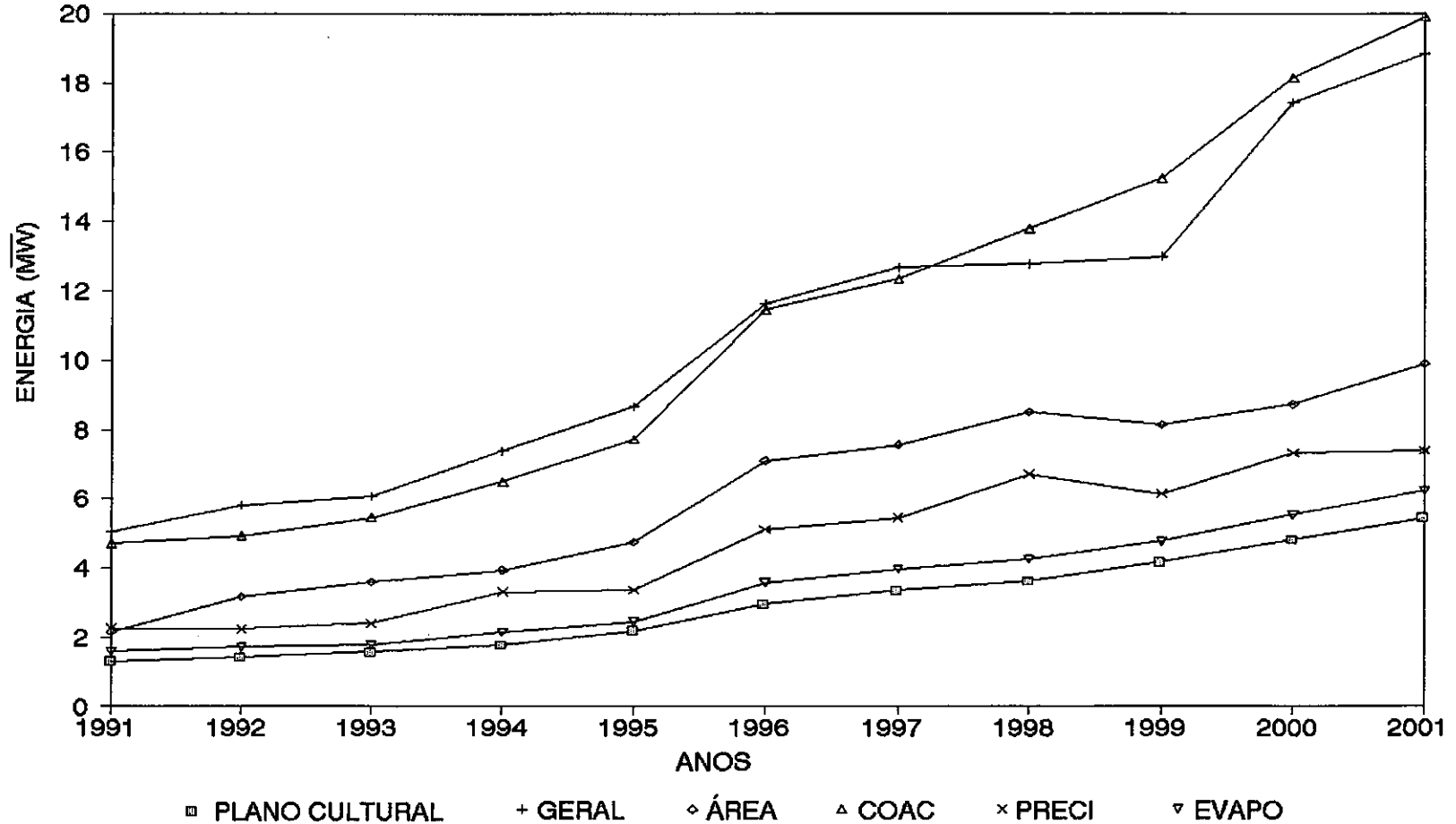


FIGURA (VII.4) - DESVIO PADRÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

COEF. DE VARIAÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME

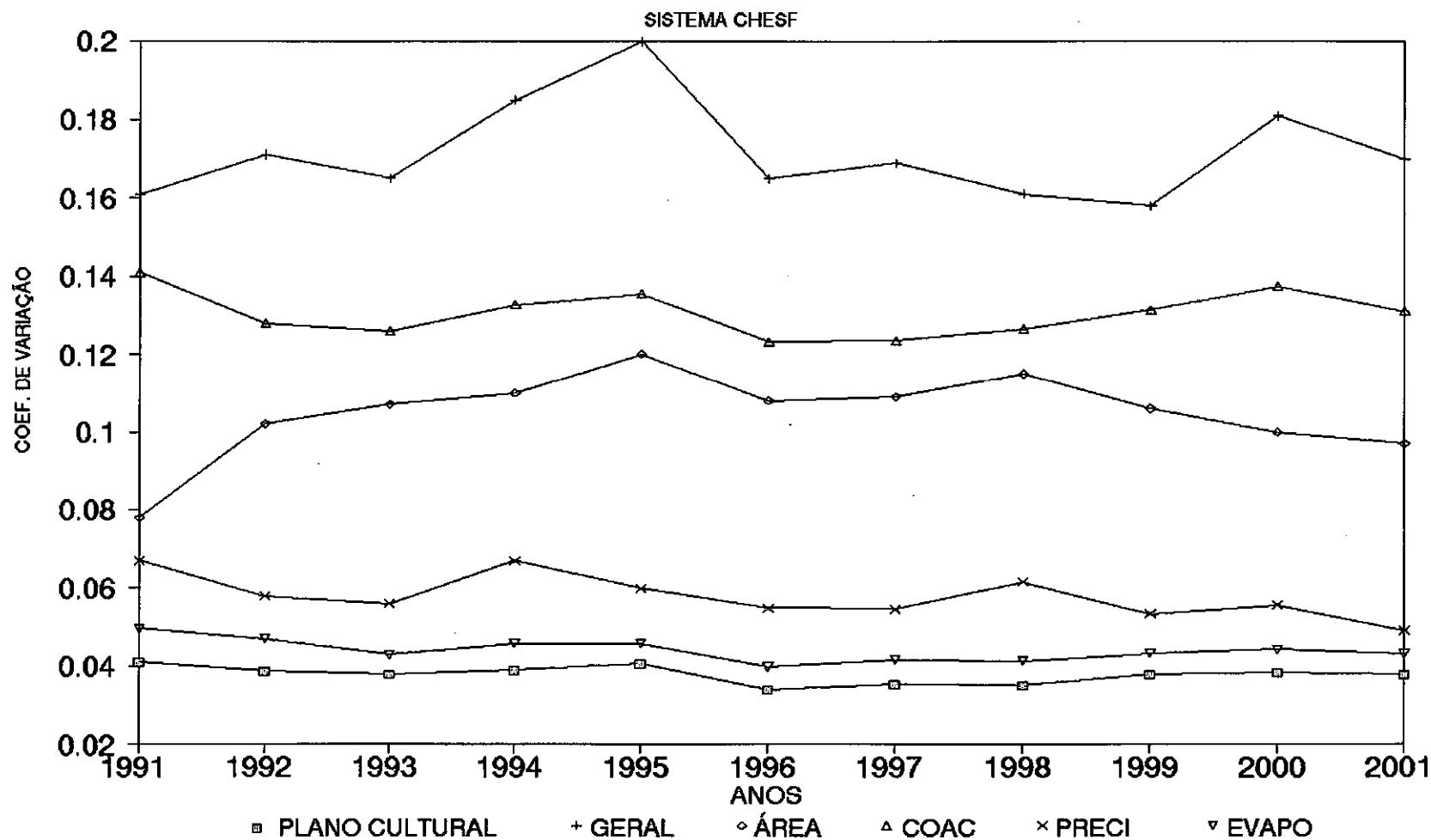


FIGURA (VII.5) - COEF. DE VARIAÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA FIRME DA CHESF.

7.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Verifica-se na figura (VII.1) dois grupos de curvas representativas das perdas médias de energia firme devido à irrigação. O grupo superior corresponde às simulações quando são isolados a precipitação, o coeficiente de ocupação da área cultivada, o plano cultural e a evapotranspiração potencial. O inferior são referentes às simulações para o cenário geral, onde são utilizadas séries sintéticas geradas para todos os parâmetros, e aquela correspondente à área disponível para irrigação. A diferença dos resultados dos dois grupos deve-se à limitação das áreas irrigáveis geradas, com referência àquelas previstas pelo PLANVASF para o ano 2001, conforme item (4.2.1).

Através das figuras (VII.4) e (VII.5) verifica-se que as maiores variações ocorridas nas vazões derivadas para irrigação e, conseqüentemente, nas perdas de energia firme são dos parâmetros agrícolas, principalmente o coeficiente de ocupação da área cultivada.

Mesma observação pode ser feita quando da análise das figuras (VII.2) e (VII.3). Os fatores climatológicos pouco fazem variar as perdas de energia firme quando comparados aos parâmetros agrícolas.

A simulação para o coeficiente de ocupação da área cultivada apresentou, nos últimos anos, valores dos desvios padrão superiores aos obtidos quando da simulação para o cenário geral. Esse fato ocorreu devido às limitações das áreas cultivadas geradas, citadas acima.

VIII - CONCLUSÕES FINAIS

Ao contrário do previsto pelo PLANVASF (1988), observa-se que até o ano 2001 a perda de energia firme, decorrente da retirada d'água para irrigação, não afetará substancialmente a geração de energia do sistema CHESF, observadas as taxas de crescimento das áreas potencialmente irrigáveis adotadas nesse estudo. A razão principal da diferença entre os dois resultados obtidos está no valor do coeficiente de ocupação da área cultivada (COAC). O PLANVASF utilizou o valor médio teórico de 0,75, enquanto que, este autor adotou o valor médio igual a 0,3243, verificado nos perímetros em operação da CODEVASF durante o período de 1985 até 1990, conforme tabela (IV.12). Observando-se a evolução histórica do valor médio anual desse coeficiente, no período 1985/1990, não constata-se nenhuma tendência evidente de crescimento. Deve-se, portanto, para cálculo da vazão derivada para irrigação, utilizar o valor médio histórico do COAC ao invés do valor teórico. Poder-se-á constatar, no futuro, uma tendência de crescimento desse coeficiente, em função da modernização dos perímetros públicos e de uma incorporação significativa de áreas com exploração empresarial, especialmente com culturas permanentes (fruticulturas).

A vazão derivada para irrigação não deverá influenciar a operação do sistema hidrelétrico, visto que, no ano 2001 essa retirada será 59,4 m³/s, correspondendo a apenas 2,9% da vazão regularizada do rio São Francisco, prevista atualmente em 2060 m³/s.

Observa-se grande semelhança entre a previsão de derivação média de 297,7 m³/s da água do rio São Francisco para irrigação da área irrigável total da bacia, prevista em 2.300.000 ha, feita pela CODEVASF (1977), e a vazão média de, aproximadamente, 325,2 m³/s determinada nesse estudo. Devido a proximidade dos resultados e a diferença de metodologias empregadas nos dois trabalhos, pode-se concluir favoravelmente sobre a metodologia e os resultados aqui apresentados.

A consideração da estocasticidade mostrou-se, para as variáveis consideradas, desnecessária na verificação da influência do uso da água para irrigação no cálculo da energia firme de um sistema hidrelétrico interligado. Essa conclusão deve-se aos pequenos valores dos desvios

padrão e coeficientes de variação observados. A inclusão da eficiência total do sistema de irrigação e do coeficiente de retorno da água derivada como variáveis aleatórias devem fazer crescer o desvio padrão e, conseqüentemente, o coeficiente de variação, podendo, portanto, tornar a estocasticidade significativa.

O coeficiente de variação dos parâmetros intervenientes apresentou, segundo tabela e figura (VII.5), valores crescentes para a evapotranspiração potencial, a precipitação, a área irrigável disponível e o coeficiente de ocupação da área cultivada. Conclui-se, portanto, que os parâmetros agrícolas predominam em variabilidade quando comparados aos parâmetros climatológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE FILHO, M. G. (1984), "Estudo sobre Uso Múltiplo de Água", Relatório Técnico - CHESF/DSG, Recife, PE.
- BENJAMIN, J. R. & CORNELL, C. A. (1970) - "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers", Editora McGraw-Hill, E.U.A..
- CEPEL (1988a) - "Programa SIMULADIN - Manual do Usuário", Relatório Técnico, Rio de Janeiro, RJ.
- CEPEL (1988b) - "Programa SIMULADIN - Manual do Sistema", Relatório Técnico, Rio de Janeiro, RJ.
- CHESF/DSG (1982) - "Síntese dos Principais Consumidores de Água na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1983a) - "Uso Múltiplo de Águas na Bacia Hidrográfica do São Francisco", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1983b) - "Uso das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1983c) - "Aspectos Conflitantes no Uso Múltiplo das Águas do Vale do São Francisco", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1984) - "Baixo São Francisco - Uso Múltiplo das Águas", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1985a) - "Avaliação Preliminar dos Impactos da Implantação do Projeto de Irrigação do Nordeste no Atendimento ao Mercado de Energia Firme da Região", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DSG (1985b) - "Alguns Tópicos sobre o Uso Múltiplo das Águas na Bacia do Rio São Francisco", Relatório Técnico, Recife, PE.

- CHESF (1986) - "Projeto PG - Definição de Evapotranspiração Potencial (ETP)", Relatório Técnico, Consórcio com TSE e PROTECS, Recife, PE.
- CHESF/DGM (1990) - "Boletim de Dados e Critérios Básicos (BODEC)", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DGM (1991a) - "Cenário de Irrigação para a Bacia do São Francisco Período 1992/2001", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CHESF/DGM (1991b) - "Alternativas de Geração de Médio Prazo para o Sistema Interligado Norte/Nordeste (Implicações sobre a Integração do médio Tocantins/Xingó)", Relatório Técnico, Recife, PE.
- CODEVASF (1977) - "Uso Múltiplo das Águas do Rio São Francisco - Esquema de Utilização", Relatório Técnico, Três Marias, MG.
- CODEVASF (1989) - "Dados de Acompanhamento e Índices de Operação e Manutenção", Relatório Técnico, Brasília, DF.
- CUNHA, S. H. F. et alii (1986) - "Modelo de Simulação e Usinas Individualizadas para Estudos de Usos-Múltiplos de Água em Sistemas Interligados", VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, São Paulo, SP.
- DNOCS (1976) - "Perímetro Irrigado de Morada Nova - Plano de Exploração para o ano 1976", Relatório Técnico, Recife, PE.
- FAO (1974) - (DASTANE, N. G.) - "Precipitación Efectiva en la Agricultura de Regadío", Coleção FAO N^o 25, Roma.
- FAO (1977) - (DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O.) - "Guidelines for Predicting Crop Water Requirements", Coleção FAO N^o 24, Roma.
- FAO (1979) - (DOORENBOS, J. & KASSAM, A. H.) - "Yield Response to Water", Coleção FAO N^o 33, Roma.

- FAO (1982) - (BOS, M. G. & NUGTEREN, J.) - "On Irrigation Efficiencies", Coleção FAO N^o 19, terceira Edição, Roma.
- FROITZHEIN, A. et alii (1987) - "Avaliação do Impacto da Otimização Alternativa das Águas do Rio São Francisco sobre o Sistema Hidrelétrico da Bacia", VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, Salvador, BA.
- HARGREAVES, G. H. (1973) - "Disponibilidades e Deficiências de Umidade para a Produção Agrícola no Ceará", Publicação do Departamento de Engenharia Agrícola e Irrigação, UFCE - Ceará.
- HARGREAVES, G. H. (1975) - "Requerimento de Água para Culturas Irrigadas e Agricultura Seca", Tradução do Original por Ricardo Brito, Recife, PE.
- ITURRI, M. P. (1983) - "Relacion Agua Suelo Planta - Requerimientos de Agua de Las Plantas on Relación con el Clima y el Suelo para una Producción Optima", Publicação do I.I.C.A., Santo Domingo, D.N.
- KELMAN, J. (1987) - "Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos", Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Vol. 1, Editora Nobel, São Paulo, SP.
- MAFRA, R. C. (1987) - "Culturas Irrigadas: Relações Planta-Solo-Água-Clima", Apostila publicada na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE.
- MINTER (1984) - "Dados Climatológicos Básicos do Nordeste", Relatório Técnico, Recife, PE.
- PEREIRA, A. A. (1977) - "Utilização Múltipla das Águas do São Francisco - Possibilidade de Conflito de Interesses", Relatório Técnico da ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, RJ.
- PLANVASF (1986a) - "Estudo Climatológico da Bacia do Rio São Francisco", Relatório Técnico, Brasília, DF. DF.

PLANVASF (1986b) - "Plano Diretor para o Desenvolvimento do Vale do São Francisco - Relatório da Etapa I - Síntese", Relatório Técnico, Brasília, DF.

PLANVASF (1987) - "Análise de Oferta/Demanda de Água do Rio São Francisco", Relatório Técnico, Brasília, DF.

PLANVASF (1988) - "Compatibilização do Uso dos Recursos Hídricos Superficiais para o Desenvolvimento Econômico e Social da Região do PLANVASF", Relatório Técnico, Brasília, DF.

SILVA, A. M. & SILVA, E. L. (1983) - "Necessidade de Água para Irrigação", Informativo Agropecuário, Belo Horizonte, MG.

APÊNDICE A

MODELO SIMULADIN

A.1 - DESCRIÇÃO DO MODELO SIMULADIN

O modelo SIMULADIN, desenvolvido pelo CEPEL (1988a, 1988b) em cooperação com a CHESF, tem por objetivo simular a operação energética de dois sistemas de geração hidrelétrica interligados em termos elétricos, e isolados em termos hidráulicos, sujeitos a restrições de uso múltiplo de água como irrigação e controle de cheia. Pode também ser usado para calcular a energia garantida do sistema a um nível de risco pré-fixado. A descrição do SIMULADIN, a seguir, é calcada fortemente no texto original.

A metodologia empregada no modelo SIMULADIN constitui-se de uma mistura de técnicas de simulação, técnicas de otimização, algoritmos heurísticos e técnicas de programação estruturada.

O sistema de geração é constituído por dois subsistemas hidráulicamente independentes mas eletricamente interligados. Cada subsistema é composto de um conjunto de usinas hidrelétricas com reservatório ou fio d'água. Usinas termoeletricas, se existirem, devem ser tratadas como geração externa. A configuração, como já foi dito, pode ser estática ou evoluir dinamicamente ao longo do período de estudo. No segundo caso, a capacidade da interligação em cada sentido também pode variar ao longo do período de estudo.

O uso alternativo da água dos rios , correspondente a derivação para irrigação, é representado por um arquivo de vazões mensais cujos valores devem ser subtraídos da vazão incremental no ponto de captação no correspondente mês.

O modelo SIMULADIN pode utilizar uma simulação de diversas séries hidrológicas em paralelo, implicando numa maior eficiência computacional, quando comparado a outros modelos.

As restrições de intercâmbio de energia entre os subsistemas são tratados no SIMULADIN através de um algoritmo simples, inspirado na técnica de relaxação.

A simulação da operação mensal de um sistema é um processo

iterativo descrito em CUNHA et alii (1986) e CEPEL (1998a e 1988b). Existem três subproblemas principais: cálculo da energia gerada, enchimento dos reservatórios e esvaziamento dos reservatórios.

O processo iterativo termina sempre que ocorre uma das seguintes condições:

- a diferença entre o mercado e a produção de energia é menor que o critério de convergência.
- existe déficit na produção mas as usinas já estão com os reservatórios vazios ou estão turbinado o máximo.
- existe excesso na produção mas as usinas estão com os reservatórios cheios ou estão turbinando o mínimo.
- um número máximo de iterações foi atingido.

O cálculo da produção de energia em cada usina e no sistema é realizado pelo SIMULADIN, conhecendo-se os volumes no início do mês e as metas de volume no fim do mês, fixadas pelas rotinas responsáveis pelo cálculo do enchimento e esvaziamento dos reservatórios.

A rotina responsável pela operação de enchimento procura, primeiramente, equilibrar os volumes dos reservatórios numa mesma faixa, e dentro de cada faixa percorre os reservatórios de acordo com sua prioridade de enchimento (normalmente de jusante para montante). Isto é feito percorrendo-se os reservatórios na sequência de prioridades procurando um que esteja na faixa mais vazia. Esgotada esta faixa o processo é repetido para a faixa seguinte e assim sucessivamente até a faixa mais cheia.

O processo de enchimento para, quando a soma das diminuições de geração em cada usina eliminar o total de excesso, ou quando não há mais nenhuma operação possível.

A rotina de esvaziamento opera analogamente a rotina de enchimento, trocando-se as vazões limites e operando os reservatórios

conforme a prioridade de esvaziamento fornecida.

Com a finalidade de promover o controle de cheias nos reservatórios, o SIMULADIN admite a primeira curva de controle (faixa) desses reservatórios como volume de espera, enquanto a usina mantém uma vazão defluente máxima que não cause danos a jusante, denominada vazão de restrição. Essa vazão de restrição só será violada após o completo enchimento do reservatório.

Informações detalhadas sobre o SIMULADIN podem ser encontradas em CEPEL (1988a, 1988b) e CUNHA et alii (1986).

A.2 - MODIFICAÇÕES INTRODUZIDAS NO MODELO SIMULADIN

Para o cálculo da energia firme proposto neste trabalho foi necessário a introdução de modificações no modelo SIMULADIN original, tendo em vista as séries históricas de vazões afluentes e as séries sintéticas de vazões derivadas para irrigação.

Criou-se através da metodologia descrita no capítulo (IV), um arquivo de dados de acesso direto contendo 13.200 registros, cada um com 500 palavras. Os 13.200 registros do arquivo representam os dados correspondentes aos 11 anos do horizonte simulado (1991/2001), cada um contendo 100 séries de vazões mensais derivadas para irrigação, conforme o esquema da figura (A.1). Cada registro contém a retirada mensal de água para uso em irrigação em até 500 usinas, identificadas pelo número do seu posto fluviométrico correspondente.

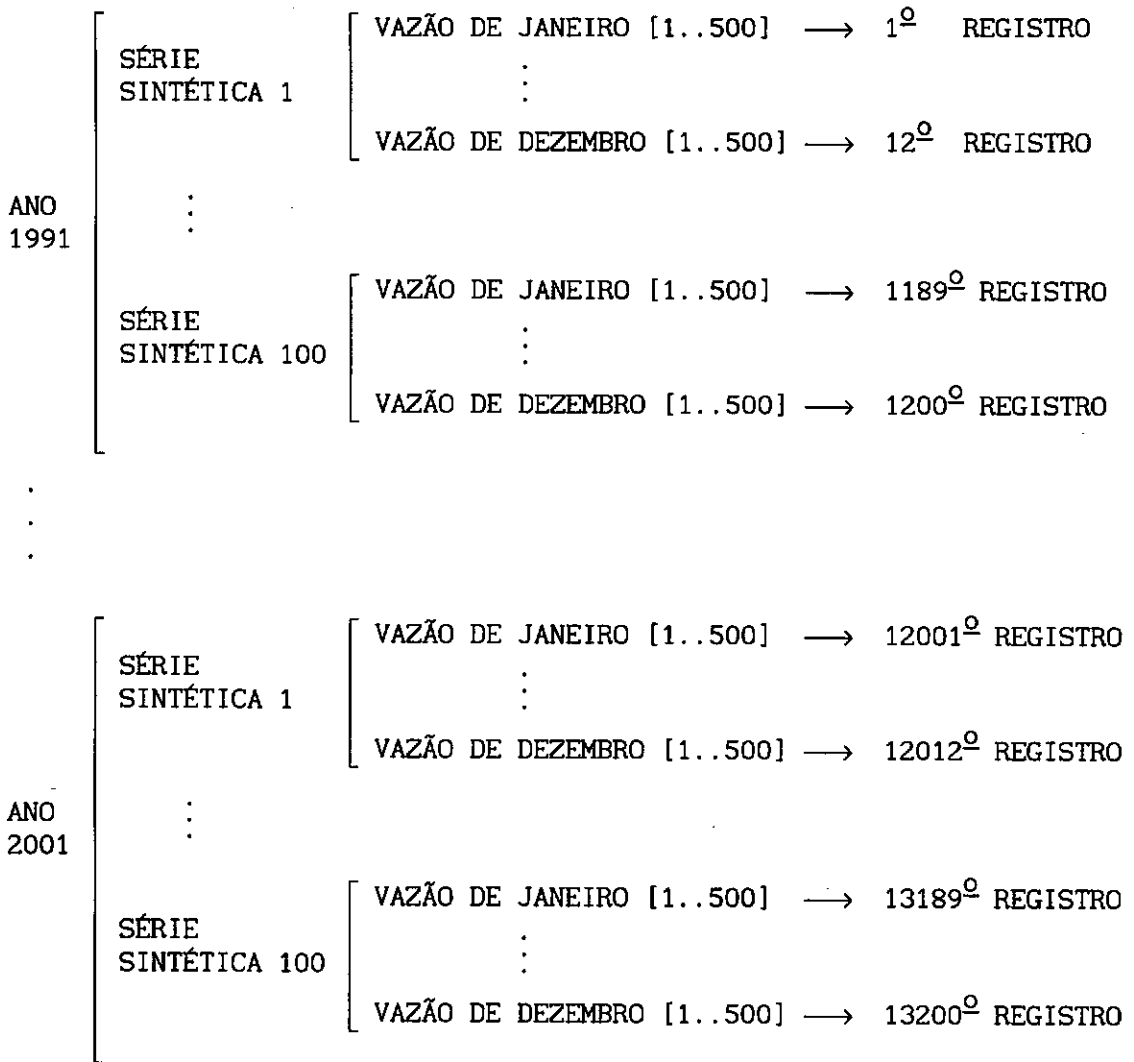


FIGURA (A.1) - ESQUEMA DOS REGISTROS DO ARQUIVO DE VAZÃO DERIVADA PARA IRRIGAÇÃO.

O programa SIMULADIN original admite uma mesma variável para controlar a ordem de leitura do registro dentro dos arquivos de vazão histórica afluente e vazão derivada para irrigação. O arquivo de vazão histórica contém em cada registro o valor da descarga média mensal de até 500 postos fluviométricos a partir de janeiro de 1931, contendo portanto, 12 registros para cada ano ao invés dos 1200 registros existentes no arquivo de vazão sintética de irrigação.

Com o objetivo de contornar esta diferença entre os dois arquivos foram introduzidas novas variáveis ao Modelo e aberto um novo arquivo de dados contendo o valor da variável de controle de leitura do arquivo de vazão derivada para irrigação para cada simulação.

Outra alteração processada no SIMULADIN foi realizada com o objetivo de permitir a impressão, em novo arquivo, dos déficits mensais do sistema integrado e de cada subsistema individualmente ao longo do período simulado. Estes déficits servem de base para a seleção dos novos mercados fixados para os subsistemas até que se obtenha a convergência desejada no cálculo da energia firme.

APÊNDICE B

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA INTERLIGADO NORTE/NORDESTE

NOME	USINA		USINA A JUSANTE	RIO	TURBINA	REGIÃO EVAPO.	POT. EFETIVA (MW)	REND. MÉDIO (%)	C. F. MÉDIO	PERDA HIDR.	DES. MÍN. (M ³ /S)	VOLUMES		
	NÚMERO	POSTO										MÍN. (HM ³)	VERT. (HM ³)	MÁX. (HM ³)
ARAÇÁ	2747	336	-	PARNAÍBA	KAPLAN	13	120	90	75,9	0,5	218	500	500	500
B.ESPERANÇA	2744	190	2747	PARNAÍBA	FRANCIS	13	216	89	260,0	1,0	161	3173	3173	5059
ITAPARICA	2734	172	2737	S.FRANCIS	FRANCIS	15	1500	91	251,5	0,8	654	7238	7238	10782
ITAPEBI	2414	192	-	JEQUIT.	FRANCIS	7	375	92	29,0	2,4	48	1800	1800	1800
P. AFONSO	2737	175	2739	S.FRANCIS	FRANCIS	15	4284	90	136,9	0,6	654	1275	1275	1275
P. CAVALO	2751	4	-	PARAGUAÇU	FRANCIS	30	300	89	5,0	2,2	11	2985	2985	4631
SACOS	2728	159	-	FORMOSO	FRANCIS	8	114	90	465,0	2,5	59	72	72	250
SERRA MESA	3005	209	3026	TOCANTINS	FRANCIS	17	1200	86	333,0	3,5	98	11150	27767	54400
SOBRADINHO	2731	169	2734	S.FRANCIS	KAPLAN	13	1050	92	362,5	0,5	1000	5447	5447	34116
T. MARIAS	2708	155	2731	S.FRANCIS	KAPLAN	8	396	87	511,5	0,6	500	4250	8526	19528
TUCURUÍ	3026	255	-	TOCANTINS	FRANCIS	16	7260	93	7,6	0,6	2000	13487	45500	45500
XINGÓ	2739	176	-	S.FRANCIS	FRANCIS	15	3000	92	17,5	1,7	664	3944	3944	3944

TABELA (B.1) - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-OPERATIVAS DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DO SISTEMA NORTE-NORDESTE.

SISTEMA	USINAS	NOME	POTÊNCIA INSTALADA (MW)
NORTE	HIDRÁULICAS	TUCURUÍ	3960,0
		PEQUENAS USINAS	42,0
	TÉRMICAS	SÃO LUÍS	116,0
NORDESTE	HIDRÁULICAS	SOBRADINHO	1050,0
		PAULO AFONSO	4284,0
		BOA ESPERANÇA	234,0
		ITAPARICA	1500,0
		PEQUENAS USINAS	77,6
	TÉRMICAS	BONGÍ	142,5
		CAMAÇARI I	290,0
		CAMAÇARI II	112,2

TABELA (B.2) - PARQUE GERADOR EXISTENTE EM 1991

USINA	MOTORIZAÇÃO	UNIDADE	DATA
XINGÓ	(10 x 500,0 MW)	RESERVAT.	AGO/1994
		1/10	DEZ/1994
		2/10	ABR/1995
		3/10	AGO/1995
		4/10	DEZ/1995
		5/10	ABR/1996
		6/10	AGO/1996
P. DO CAVALO	(4 x 150,0 MW)	1/4	DEZ/1996
		2/4	ABR/1997
SACOS	(4 x 28,5 MW)	RESERVAT.	MAR/1998
		1/4	JUN/1998
		2/4	SET/1998
		3/4	DEZ/1998
		4/4	MAR/1999

USINA	MOTORIZAÇÃO	UNIDADE	DATA
TUCURUÍ II	(10 x 330,0 MW)	1/10	JAN/1999
		2/10	MAI/1999
		3/10	SET/1999
		4/10	JAN/2000
		5/10	MAI/2000
		6/10	SET/2000
		7/10	JAN/2001
ARAÇÁ	(4 x 30,0 MW)	RESERVAT.	MAR/1999
		1/4	JUN/1999
		2/4	SET/1999
		3/4	DEZ/1999
ITAPEBI	(3 x 125,0 MW)	4/4	MAR/2000
		RESERVAT.	AGO/2001
		1/3	NOV/2001

TABELA (B.3) - PROGRAMA DE GERAÇÃO PARA O PERÍODO - 1991/2001

NOME	K0	K1	K2	K3	K4
ARAÇÁ	1,00100E+02	0,0	0,0	0,0	0,0
B.ESPERANÇA	2,82035E+02	6,68067E-03	-6,28550E-07	3,68989E-11	-7,79909E-16
ITAPARICA	2,75813E+02	6,76489E-03	-8,86837E-07	7,06792E-11	-2,23986E-15
ITAPEBI	1,10000E+02	0,0	0,0	0,0	0,0
P. AFONSO	2,52000E+02	0,0	0,0	0,0	0,0
P. CAVALO	6,62016E+01	2,32273E-02	-4,66576E-06	6,33455E-10	-3,60231E-14
SACOS	5,10079E+02	8,64180E-01	-7,84444E-03	3,40741E-05	-5,33333E-08
SÉRRÁ MESA	3,77766E+02	5,05707E-03	-1,69804E-07	3,09587E-12	-2,15555E-17
SOBRADINHO	3,74179E+02	1,39669E-03	-5,35159E-08	1,15599E-12	-9,54599E-18
T. MARIAS	5,30370E+02	4,33590E-03	-2,45290E-07	8,88770E-12	-1,33470E-16
TUCURUÍ	3,04005E+01	2,18330E-03	-5,54153E-08	8,28651E-13	-4,93503E-18
XINGÓ	1,38000E+02	0,0	0,0	0,0	0,0

TABELA (B.4) - COEFICIENTES DOS POLINÔMIOS DAS CURVAS VOLUME x COTA DAS USINAS DO SISTEMA N/NE.

NOME	K0	K1	K2	K3	K4
ARAÇÁ	1,20000E02	0,0	0,0	0,0	0,0
B. ESPERANÇA	-5,40594E02	-1,12572E+01	1,49233E-01	-6,70269E-04	1,09688E-06
ITAPARICA	-1,99695E05	1,82225E+03	-4,43570E+00	-1,91762E-03	1,29211E-05
ITAPEBI	6,40000E01	0,0	0,0	0,0	0,0
P. AFONSO	1,17000E02	0,0	0,0	0,0	0,0
P. CAVALO	-4,57813E00	1,23016E-01	1,70505E-03	-1,02411E-05	7,05319E-07
SACOS	5,28519E04	-4,04073E+02	1,16091E+00	-1,48600E-03	7,15315E-07
SERRA MESA	-9,02925E05	8,03013E+03	-2,65979E+01	3,87500E-02	-2,08333E-05
SOBRADINHO	-5,03710E05	4,91379E+03	-8,96689E+00	-1,89169E-02	4,65379E-05
T. MARIAS	-1,20392E06	6,74910E+03	-1,26388E+01	7,90752E-03	0,0
TUCURUÍ	1,45532E04	-9,58921E+02	2,38222E+01	-2,57136E-01	1,09373E-03
XINGÓ	8,50000E01	0,0	0,0	0,0	0,0

TABELA (B.5) - COEFICIENTES DOS POLINÔMIOS DAS CURVAS COTA x ÁREA DAS USINAS DO SISTEMA N/NE.

NOME	VOL. ÚTIL MÉDIO HM ³	COTA DO VOLUME ÚTIL MÉDIO EM M	ÁREA DA BACIA DA COTA MÉDIA - KM ²
B. ESPERANÇA	4.116,0	301,2	320,0
ITAPARICA	9.010,0	301,7	720,4
P. CAVALO	3.808,0	114,4	137,3
SACOS	161,0	552,2	10,6
SERRA MESA	33.144,5	445,6	1.191,7
SOBRADINHO	19.781,5	388,4	2.786,2
T. MARIAS	11.889,0	559,5	719,6
TUCURUÍ	29.493,5	64,1	1.710,0

TABELA (B.6) - COTA RELATIVA AO VOLUME ÚTIL MÉDIO E ÁREA
CORRESPONDENTE A ESTA COTA.

REGIÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
7	0,0	0,0	0,0	143,0	143,0	143,0	143,0	143,0	143,0	143,0	143,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	0,0
13	142,0	119,0	120,0	137,0	156,0	150,0	159,0	182,0	199,0	202,0	92,0	87,0
15	169,0	123,0	125,0	123,0	116,0	118,0	139,0	157,0	190,0	190,0	138,0	159,0
16	56,0	44,0	46,0	46,0	58,0	75,0	82,0	86,0	83,0	88,0	86,0	76,0
17	52,0	41,0	50,0	51,0	72,0	73,0	106,0	135,0	127,0	88,0	60,0	50,0
30	66,8	74,5	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2	62,9	86,8	18,8	32,9

TABELA (B.7) - DADOS DE EVAPORAÇÃO DAS REGIÕES DO N/NE EM mm/mês.

FAIXA DE POTENCIA (MW)	MANUTENÇÃO IP	PANE TEIF	FCmáx
10 - 29	0,049	0,021	0,931
30 - 59	0,048	0,015	0,938
60 - 199	0,070	0,022	0,910
200 - 499	0,080	0,048	0,876
500 - 1300	0,080	0,060	0,865

TABELA (B.8) - TAXAS DE INDISPONIBILIDADE DE GERAÇÃO.

NOME	TAMANHO DAS UNIDADES (MW)	MANUTENÇÃO IP	PANE TEIF	FCmáx
ARAÇÁ	4 x 30	0,048	0,015	0,94
B. ESPERANÇA	2 x 54 + 2 x 63	0,048 0,070	0,015 0,022	0,92
ITAPARICA	6 x 250	0,080	0,048	0,88
ITAPEBI	3 x 125	0,070	0,022	0,91
P. AFONSO	3x(60+75+85)+4x(216+110)+6x410	VÁRIAS	VÁRIAS	0,89
P. CAVALO	2 x 150	0,070	0,022	0,91
SACOS	4 x 28,5	0,049	0,021	0,93
SERRA MESA	3 x 400	0,080	0,048	0,88
SOBRADINHO	6 x 175	0,070	0,022	0,91
T. MARIAS	6 x 66	0,070	0,022	0,91
TUCURUÍ	24 x 330	0,080	0,048	0,88
XINGÓ	6 x 500	0,080	0,060	0,86

TABELA (B.9) - FATOR DE CAPACIDADE MÁXIMA DAS USINAS DO SISTEMA INTEGRADO NORTE/NORDESTE.

ANO	NORTE --> NORDESTE	NORDESTE --> NORTE
1991	297	880
1992	437	880
1993	497	880
1994	697	907
1995	920	1046
1996	860	1037
1997	830	1027
1998	727	1020
1999	1393	763
2000	1367	763
2001	1367	763

TABELA (B.10) - LIMITES DE TRANSMISSÃO NA INTERLIGAÇÃO N/NE EM MW.

